

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Návrh rozvodu a směšovací stanice alternativních plyných
paliv**

Design of mixing station for alternative gaseous fuels

Student:

Bc. Robert Olejník

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Robert Olejník**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh rozvodu a směšovací stanice alternativních plyných paliv**
Design of Mixing Station for Alternative Gaseous Fuels
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši týkající se využívání plyných paliv v energetice.
 2. Předložte aktuální literární informace o dopravě a směšování topných plynů.
 3. Určete fyzikální a chemické vlastnosti plynu, který je tvořen směsí dusíku a pyrolýzního a zemního plynu. Vlastnosti určete také pro samostatné plyny.
 4. Proveďte konstrukční návrh potrubí pro dopravu uvedených plynů z jednotlivých technologií.
 5. Proveďte konstrukční návrh směšovací stanice pro uvedené plyny.
- (Konkrétní vstupní data obdrží diplomant od vedoucího práce.)

Seznam doporučené odborné literatury:

KYSELA, L. *Plynárenství*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008. 73 s.
FÍK, J. *Spalování plyných paliv a plynové hořáky*. Praha: GAS s.r.o., 1998. 232 s. ISBN 80-86176-01-0
Plyn ve vytápění. Společnost pro techniku prostředí, Praha, 1994. 105 s.
ŘEDR, M., PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. 1. vydání. SNTI. – Nakladatelství technické literatury, 1991. 680 s. ISBN 80-03-00366-0.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Honus, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Bruntále 25.4.2017

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Bruntále : 25. 4. 2017

Bc. Robert Olejník

Adresa trvalého pobytu autora práce:

plné jméno autora práce

Bruntál, Dělnická 1337/13, 792 01

Prohlašuji, že

- ve spolupráci s centrem Enet jsem převzal některé interní informace týkající se jejich technologií pro osobní využití a uvedl jsem je v diplomové práci. Tyto informace jsou v diplomové práci utajeny. V případě zájmu jsou dostupné na Katedře energetiky, Fakulty strojní, VŠB-TU Ostrava.

V Bruntále: 25. 4. 2017

Bc. Robert Olejník

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bruntál, Dělnická 1337/13, 792 01

plné jméno autora práce

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Stanislavu Honusovi, Ph.D. a doc. Dr. Ing. Bohumíru Čechovi za odborné vedení, ochotu, cenné rady, připomínky a předání mnohých zkušeností při vedení mé diplomové práce.

Anotace

OLEJNÍK, R. *Návrh rozvodu a směšovací stanice alternativních plyných paliv.* Ostrava, 2017. 85 s. Diplomová práce. VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky. Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.

Úkolem diplomové práce je navrhnout potrubní rozvod plynů do směšovací stanice a následně i navrhnout samotnou směšovací stanici. V textové části je nejprve vytvořena rešerše týkající se využívání technických a topných plynů v praxi. Na tuto část postupně navazují specifikace plynů, které se budou dopravovat do směšovací stanice. Ve výpočtové části se práce prostřednictvím výpočtových vztahů zabývá složením směsného plynu, fyzikálními vlastnostmi jednotlivých plynů i samotného plynu směsného, přičemž jsou vypočteny a navrženy potrubní tratě jednotlivých plynů směřujících do směšovací stanice. Konstrukční část práce se zabývá návrhem směšovací stanice a směšovací komory, ve které se jednotlivé plyny mísí. Grafická část práce obsahuje schémata jednotlivých potrubních tratí a směšovací stanice, 3D model směšovací komory a výkres směšovací komory.

Annotation of the Thesis

OLEJNÍK, R. *Design of mixing station for alternative gaseous fuels.* Ostrava, 2017. 85 s. Master Thesis. VŠB – TU Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, The Department of Power Engineering. Thesis head: doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.

The task of the diploma thesis is to design the pipeline distribution of gases to the mixing station and then design the mixing station itself. In the text part is first created a search regarding the use of technical and heating gases in practice. This part is followed by the gas specifications that will be transported to the mixing station. In the computational part, the work with the help of calculation relations deals with the composition of the mixed gas, the physical properties of the individual gases and the mixing gas itself, and the pipelines of the individual gases leading to the mixing station are calculated and designed. The construction part deals with the design of the mixing station and the mixing chamber, in which the individual gases are mixed. The graphical part of the thesis contains diagrams of individual pipeline lines and mixing stations, a 3D model of the mixing chamber and a drawing of the mixing chamber.

Obsah

Seznam tabulek	- 11 -
Tabulka č. 5.1 Fyzikální vlastnosti jednotlivých složek plynů	-27--
11 -	
Seznam obrázků	- 12 -
Seznam zkratk a symbolů	- 13 -
Seznam indexů	- 15 -
1. Úvod	- 16 -
2. Technické plyny	- 17 -
2.1 Dusík	- 17 -
2.2 Kyslík	- 17 -
2.3 Vodík	- 17 -
2.4 Argon	- 18 -
2.5 Acetylen	- 18 -
2.6 Oxid uhličitý	- 19 -
3. Topné plyny	- 20 -
3.1 Rozdělení topných plynů dle normy ČSN 35 5502	- 20 -
3.2 Druhy topných plynů	- 21 -
3.2.1 Koksárenský plyn	- 21 -
3.2.2 Svítí plyn	- 21 -
3.2.3 Vysokopecní plyn	- 22 -
3.2.4 Bioplyn	- 23 -
3.3 Zemní plyn	- 23 -
3.3.1 Těžba zemního plynu	- 24 -
3.3.2 Druhy těženého zemního plynu	- 24 -
3.3.3 Doprava zemního plynu	- 25 -
3.3.4 Dodávky zemního plynu v Evropě	- 25 -
3.3.5 Doprava zemního plynu v ČR	- 26 -
3.4 Pyrolýzní plyn	- 26 -
3.4.1 Pyrolýza	- 27 -
4. Směsný plyn	- 28 -
4.1 Vlastní směsný plyn	- 28 -
5. Určení fyzikálních vlastností plynů	- 29 -
5.1 Objemové podíly jednotlivých složek plynu	- 29 -
5.2 Výpočet hustoty jednotlivých plynů	- 30 -

5.3 Výpočet hutnoty jednotlivých plynů.....	- 31 -
5.4 Výpočet výhřevnosti jednotlivých plynů.....	- 32 -
5.5 Výpočet spalného tepla jednotlivých plynů.....	- 33 -
5.6 Porovnání vypočtených hodnot	- 34 -
6. Určení objemových podílů směsného plynu.....	- 35 -
6.1 Výpočet objemového podílu směsného plynu při zadané výhřevnosti.....	- 35 -
6.1.1 Srovnání vypočtených hodnot	- 37 -
6.2 Wobbeho číslo	- 37 -
6.3 Výpočet objemového podílu směs. plynu při zadaném Wobbeho čísle	- 37 -
6.3.1 Srovnání vypočtených hodnot	- 39 -
7. Rozvody plynů před směšovací stanicí.....	- 40 -
7.1 Přívod dusíku do směšovací stanice	- 40 -
7.2 Přívod zemního plynu do směšovací stanice	- 41 -
7.3 Přívod PVC a PP plynů do směšovací stanice.....	- 42 -
7.3.1 Čištění a chlazení pyrolýzního plynu.....	- 43 -
7.3.2 Hořák zbytkového plynu.....	- 43 -
7.4 Výstup směsného plynu ze směšovací stanice.....	- 44 -
7.5 Provozní parametry jednotlivých plynů.....	- 44 -
8. Návrh směšovací stanice.....	- 45 -
8.1 Objemový průtok finálního směsného plynu.....	- 45 -
8.1.1 Výhřevnost finálního směsného plynu	- 45 -
8.2 Objemový průtok před míšeného plynu.....	- 46 -
8.3 Objemové průtoky směsných plynů při provozních parametrech	- 46 -
8.4 Objemové průtoky plynů před směšovací komorou	- 47 -
8.5 Objemové průtoky plynů před směš. kom. při provozních parametrech.....	- 48 -
8.6 Průměr potrubí za směšovacími komorami	- 49 -
8.6.1 Skutečná rychlost plynu za směšovací komorou	- 50 -
8.7 Průměr potrubí plynů před směšovací komorou.....	- 51 -
8.7.1 Skutečné rychlosti plynů před směšovací komorou	- 52 -
8.8 Shrnutí vypočtených hodnot	- 52 -
8.9 Návrh rozvodů plynu ve směšovací stanici	- 53 -
9. Určení fyzikálních vlastností směsného plynu	- 55 -
9.1 Chemické složení směsného plynu	- 55 -
9.2 Výpočet hustoty směsného plynu	- 56 -
9.3 Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu	- 57 -

9.4 Určení spalín vzniklých spálením směsného plynu	- 58 -
9.4.1 Výpočet oxidu uhličitého	- 59 -
9.4.2 Výpočet dusíku	- 59 -
9.4.3 Výpočet vodní páry	- 59 -
9.4.4 Výpočet kyslíku	- 59 -
9.5 Stanovení mezí zápalnosti (výbušnosti)	- 60 -
9.5.1 Dolní mez zápalnosti	- 61 -
9.5.2 Horní mez zápalnosti	- 63 -
9.6 Vlastnosti směsného plynu	- 64 -
10 Tlakové ztráty v potrubí směšovací stanice	- 65 -
10.1 Reynoldsova čísla	- 65 -
10.1.1 Výpočet hustot plynů v provozních stavech	- 65 -
10.1.2 Výpočet dynamických viskozit jednotlivých plynů	- 66 -
10.1.3 Výpočet Reynoldsova čísla	- 71 -
10.2 Relativní drsnost potrubí	- 73 -
10.1.1 Výpočet součinitele tření	- 73 -
10.3 Tlakové ztráty v rovném potrubí	- 75 -
10.4 Tlakové ztráty místními odpory	- 75 -
10.5 Výpočet celkových tlakových ztrát	- 75 -
10.6 Srovnání vypočtených hodnot	- 77 -
11. Návrh směšovací komory	- 78 -
11.1 Tangenciální směšovací komory	- 78 -
11.1.1 Výpočet rychlosti plynů ve výtokových otvorech trysek	- 79 -
11.1.2 Výpočet průměru vtokových otvorů	- 79 -
12. Závěr	- 81 -
Seznam použité literatury	- 83 -
Seznam příloh	- 85 -

Seznam tabulek

Tabulka č.3.1 Složení koksárenského plynu.....	-19-
Tabulka č.3.2 Složení svítiplynu.....	-20-
Tabulka č.3.3 Složení vysokopecního plynu.....	-20-
Tabulka č.3.4 Složení bioplynu.....	-21-
Tabulka č.3.5 Složení zemního plynu.....	-22-
Tabulka č. 5.1 Fyzikální vlastnosti jednotlivých složek plynů.....	-27-
Tabulka č. 5.2 Složení směsného plynu.....	-28-
Tabulka č. 5.3 Porovnání vypočtených hodnot.....	-32-
Tabulka č.6.1 Objem. podíly jednot. plynů ve směs. plynu při zadané výhřev.	-35-
Tabulka č. 6.2 Objem. podíly jednot. plynů ve směs. plynu při zadaném W. č.	-37-
Tabulka č.6.1 Provozní parametry jednotlivých plynů.....	-42-
Tabulka č. 8.1 Technické parametry kogenerační jednotky Quanto D3000.....	-43-
Tabulka č. 8.2 Hodnoty rychlostí a průměrů jednotlivých plynů.....	-51-
Tabulka č. 9.1 Chemické složení finálního směsného plynu.....	-54-
Tabulka č. 9.2 Chemické složení směsného plynu.....	-54-
Tabulka č. 9.3 Horní a spodní meze zápalnost jednotlivých složek.....	-59-
Tabulka č. 9.4 Objemové podíly hořlavých složek v čisté hořlavině.....	-60-
Tabulka č. 9.5 Vlastnosti směsného plynu.....	-62-
Tabulka č. 10.1 Složení a vlastnosti zemního plynu.....	-65-
Tabulka č. 10.2 Mezi výpočty pro výpočet dyn. vis. podle Wilkeho.....	-66-
Tabulka č. 10.3 Mezi výpočet pro výpočet dyn. vis. podle Herninga a Zipperera.....	-68-
Tabulka č. 10.4 Jednotlivé dynamické viskozity.....	-69-
Tabulka č. 10.5 Celkové tlakové ztráty.....	-75-

Seznam obrázků

Obrázek č.1 Trasa hlavních plynovodů v ČR	- 26 -
Obrázek č.2 Schéma dusíkového rozvodu do směšovací stanice	- 41 -
Obrázek č.3 Schéma rozvodu zemního plynu do směšovací stanice.....	- 42 -
Obrázek č.4 Schéma rozvodu směšovacího plynu do kogenerační jednotky	- 44 -
Obrázek č.5 Schéma trati PP plynu ve směšovací stanici.....	- 54 -
Obrázek č.6 3D model směšovací komory	- 79 -

Seznam zkratek a symbolů

Zkratka/symbol	Celý název	Jednotka
CH ₄	Methan	[-]
C ₂ H ₄	Etylen	[-]
C ₂ H ₆	Etan	[-]
C ₃ H ₆	Propylen	[-]
C ₃ H ₈	Propan	[-]
C ₄ H ₁₀	n-Butan	[-]
C ₅ H ₁₂	Pentan	[-]
C ₄ H ₈	Buten	[-]
C ₅ H ₁₀	Cyklopentan	[-]
C ₆ H ₁₂	Cyklohexan	[-]
C ₅ H ₈	Isopren	[-]
CNG	Stlačený zemní plyn	[-]
C _n H _m	Nenasycené uhlovodíky	[-]
CO	Oxid uhelnatý	[-]
CO ₂	Oxid uhličitý	[-]
C _x H _y	Nasycené uhlovodíky	[-]
DN	Jmenovitý průměr	[mm]
H ₂	Vodík	[-]
H ₂ O	Vodní pára	[-]
K	Mez zápalnosti	[%]
LNG	Zkapalněný zemní plyn	[-]
M	Molární hmotnost	[kg/kmol]
N ₂	Dusík	[-]
O ₂	Kyslík	[-]
P	Přenášený výkon	[kW]
PE	Potrubí z polyethylenu	[-]
PN	Jmenovitý tlak	[Pa]
PP	Pyrolýzní plyn na bázi polypropylenu	[-]
PVC	Pyrolýzní plyn na bázi polyvinylchloridu	[-]
Qi	Výhřevnost	[kJ/m ³]
Qs	Spalené teplo	[kJ/m ³]

Re	Reynoldsovo číslo	[-]
SDR	Poměr průměru stěny k síle stěny	[-]
T	Termodynamická teplota	[K]
V	Objem	[m ³]
V	Objemový tok	[m ³ /s]
W	Wobbeho číslo	[-]
d	Hutnota	[-]
d _i	Vnitřní průměr	[m]
k	Absolutní drsnost potrubí	[mm]
m	Hmotnost	[kg]
n	Přebytek vzduchu	[-]
p	Tlak	[Pa]
t	Teplota	[°C]
v	Rychlost proudění v potrubí	[m/s]
ε	Relativní drsnost potrubí	[-]
η	Dynamická viskozita	[Pa.s]
λ	Součinitel tření	[-]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
φ	Složka pro výpočet dyn. Viskozit	[-]
φ	Vytokový součinitel	[-]
ω	Objemový podíl	[m ³ /m ³]

Seznam indexů

Indexy	Celý název
G	Grahamovo
HZ	Herninga a Zipperera
I	Směsný plyn (zemí plyn + dusík)
N2	Dusík
W	Wilkeho
c	Celková
č	Čistá hořlavina
d	Dolní
h	Horní
i	Neznámá složka i
i,j	Složky i a j
n	Normálový
n,n	Wobbeho číslo, nižší
n,v	Wobbeho číslo, vyšší
pp	Pyrolýzní plyn na bázi polypropylenu
pvc	Pyrolýzní plyn na bázi polyvinylchloridu
sp	Směsný plyn (zemí plyn + dusík)
spa	Spaliny
sp,f	Finální směsný plyn
sk	Skutečný
t	Teoretický
vtok	Vtoková rychlost
vzd	Vzduch
x	Neznámá složka x
zp	Zemní plyn

1. Úvod

V dnešní moderní společnosti tvoří fosilní zdroje hlavní složku energetické koncepce každého státu, firmy i člověka. Ovšem je potřeba si uvědomit, že ať jsou tyto primární zdroje energie značné, tak nastanou časy, kdy se jejich množství bude rapidně snižovat, a budeme hledat různé alternativy, které nahradí jejich postavení v dnešní i budoucí společnosti. Jednou z takových alternativ je využívání tzv. druhotných zdrojů energie, které by tento proces mohly o nějaký čas oddálit.

V mé diplomové práci se konkrétněji budu zabývat záměnnou primárního zdroje energie (zemního plynu) zdrojem pocházejícím právě z již zmiňovaných druhotných zdrojů. Tato aplikace se hojně vyskytuje v průmyslových závodech pracujících se surovým železem, ale i v závodech, které zpracovávají uhlí.

V těchto závodech vznikají nízko energetické plyny, které se díky svému energetickému potenciálu dají využít i pro další technologické procesy a mohou nám dokonce nahradit i zemní plyn, což je pro tyto závody velice výhodné hlavně z ekonomického hlediska. Ovšem v tomhle momentě nastává otázka, jak by tyto nízko energetické plyny mohly nahradit zemní plyn. Odpověď na tuto otázku najdeme ve směšovacích stanicích, což jsou technologická zařízení, ve kterých se v různých poměrech mohou mísit různé druhy plynů, přičemž výsledný směsný plyn má při vhodně zvoleném směšovacím poměru takové vlastnosti, které mohou odpovídat i zemnímu plynu a mohou ho tak nahradit v plnění jeho funkcí.

Tyto poznatky se dají ovšem aplikovat i na alternativní paliva, jako například pyrolýzní plyny, které v sobě ukrývají obrovský energetický potenciál, ovšem jejich vlastnosti jim nedovolují přímé spalování a je potřeba tyto vlastnosti upravit. A právě k této úpravě se využijí již zmiňované směšovací stanice, ve kterých se pyrolýzní plyny upraví ve výsledný směsný plyn a ten se následně může již bez problémů spálit, a tím pádem využít i jeho energetický potenciál.

Cílem této práce je navrhnout směšovací stanici, která by zajistila dodávku směsného plynu do místa spotřeby, kde by směsný plyn plně nahradil zemní plyn a zajistil tak provoz tohoto zařízení.

2. Technické plyny

Technické plyny jsou skupina plynů, které se díky svým chemickým a fyzikálním vlastnostem, staly neodmyslitelnou částí některých technologických aplikací. Využití technických plynů mimo průmyslové využití (svařování, řezání) nalezneme i v potravinářství, chemickém průmyslu a metalurgii.

2.1 Dusík

Dusík je ve své přirozené formě plynný chemický prvek, který nemá zápach, barvu ani chuť a tvoří hlavní složku zemské atmosféry. Dusík je tvořen dvěma atomy, které jsou spojeny pevnou trojnou vazbou. Trojná vazba má za následek, že je dusík nereaktivní (inertní) plyn, který většinou nereaguje s jinými prvky. Této vlastnosti se využívá při vytváření ochranných dusíkových atmosfér, které se využívají v potravinářském, chemickém a strojném průmyslu. A to především pro zabránění výbuchu nebo vzplanutí hořlavých látek při styku s kyslíkem.

V kapalně formě se dusík využívá pro chlazení na velmi nízké teploty, což se převážně využívá v medicíně. Kapalnou formu dusíku získáme zkapalněním vzduchu, tento proces je založen na neustálém ochlazování vzduchu až nakonec vzduch zkondukuje. Nově vzniklá kapalina obsahuje převážně kyslík a dusík, které mají různou teplotu varu, čehož se využije pro jejich oddělení v rektifikační komoře. [1],[3],[4],[5],[6]

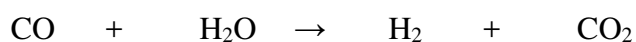
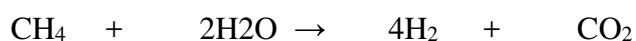
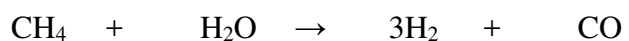
2.2 Kyslík

Kyslík je plynný, bezbarvý, dvouatomový chemický prvek, jehož přítomnost v zemské atmosféře je neodmyslitelná pro náš život. Jedná se o velmi reaktivní prvek, který reaguje s většinou prvků, až na některé vzácné plyny (halogeny). Díky této vlastnosti našel své uplatnění především průmyslové oblasti, kde se využívá pro svařování, jako podpora spalovacích procesů při vytváření tepla a elektřiny, ale našel také své uplatnění ve zdravotnictví, kde se využívá pro plnění kyslíkových bomb nebo v chemickém průmyslu, kde se využívá pro vytváření řady látek. Kyslík se převážně vyrábí destilací zkapalněného vzduchu a vyrobený kyslík se uchovává v ocelových tlakových lahvích, které jsou označený modrým pruhem. [1],[3],[4],[5],[6]

2.3 Vodík

Vodík je bezbarvý, dvouatomový plyn, který nemá chuť ani zápach. Jedná se o nejjednodušší a nejlehčí chemický prvek, který tvoří sloučeniny se všemi prvky až na

vzácné plyny. Vodík se vyznačuje mnoha užitečnými vlastnostmi, díky kterým si našel široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích (např.: snižuje obsah síry v palivu, odstraňuje znečišťující látky v palivu, slouží jako ochranný plyn při svařování nebo pájení, je vhodný jako chladicí médium pro svou vysokou teplotní vodivost). V energetice si vodík našel uplatnění v palivových článcích, kde dochází k přímé transformaci chemické energie reakce vodíku s kyslíkem na energii elektrickou. Do budoucna se s vodíkem počítá, jako s alternativním zdrojem energie, který bude výhodný po stránce ekologické, jelikož při hoření vodíku vzniká voda, tak i ekonomické, kdy se vytvoří energetická smyčka, ve které budeme vytvářet elektrickou energii, která nám z části bude sloužit pro výrobu dalšího vodíku. V současné době se pro vyrábění vodíku nejvíce využívá parní reforming zemního plynu a jiných lehkých kovů. Tento proces probíhá při teplotách 1200 – 1400 [°C] a lze ho popsat následujícími rovnicemi:



[1],[3],[4],[5],[6]

2.4 Argon

Argon je jednoatomový, bezbarvý plyn, který je těžší než vzduch. Stejně jako ostatní vzácné plyny se i argon vyznačuje vysokou chemickou netečností. Této vlastnosti se využívá pro vytváření ochranných atmosfér při svařování, metalurgii nebo v potravinářství pro uchovávání potravin. Obdobně jako dusík nebo kyslík se i argon získává frakční destilací vzduchu. [1],[3],[4],[5],[6]

2.5 Acetylen

Acetylen (C_2H_2) je chemická sloučenina, která je za normálních podmínek bezbarvá a nemá zápach. Zápach se do složky přidává, jelikož se jedná o výbušný plyn, který při reakci s kyslíkem vybuchuje. Technický acetylen se využívá především při chemických procesech, při výrobě plastů (PVC) ale našel své zastoupení i v průmyslu, kde se využívá pro řezání plamenem, vyřezávání plamenem nebo svařování plamenem, kde dosahujeme spalováním směsi acetylenu s kyslíkem teplotu plamene až 3 000[°C]. Acetylen se vyrábí hydrolýzou karbidu vápenatého nebo vysokoteplotní pyrolýzou

methanu, kdy se použije zemní plyn nebo plyny uvolněné po krakování ropy.
[1],[3],[4],[5],[6]

2.6 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn, který nemá chuť ani zápach. Jedná se o plyn, který je průmyslově lehce dostupný a je pro své fyzikální a chemické vlastnosti využíván v řadě procesů. Snad nejznámější aplikací oxidu uhličitého nalezneme v potravinářství v podobě perlivých nápojů, dále se v potravinářství využívá pro vytváření ochranné atmosféry pro balení a uchování potravin. Ovšem oxid uhličitý si našel uplatnění i v jiných odvětvích např.: jako alternativa pro neutralizaci odpadních vod při jejich překyselení nebo jako hnací plyn ve sprejích, kde nahradil škodlivé chlorofluorované uhlovodíky. Po zmrazení se oxid uhličitý mění v suchý led, který se využívá pro chlazení nebo jako náplň hasících přístrojů. Oxidu uhličitý se v průmyslu vyrábí tepelným rozkladem vápence, ale nejběžnější způsob produkce oxidu uhličitého je spalování fosilních paliv.
[1],[3],[4],[5],[6]

3. Topné plyny

Topné plyny jsou látky, které jsou za normálních podmínek plynné a díky svému energetickému potenciálu jsou využívány v technologických zařízeních. Převážně se jedná o transformaci chemické energie obsažené v topných plynech na teplo, které se dále přímo využívá nebo se transformuje na jinou energii (např. mechanickou energii). Topné plyny rozlišujeme:

a) Primární – Plynná paliva získaná těžbou, a to především zemní plyn a degazační plyn, který se získává v menším množství z uhelných nalezišť. [1],[2],[10]

b) Sekundární – Plynná paliva vznikající jako sekundární produkt z technologických procesů. Jedná se především o koksárenský plyn a svítiplyn, které vznikají při vysokoteplotní karbonizaci v koksovárnách. Vysokopecní plyn, který vzniká jako odpadní plyn v metalurgických procesech. Bioplyn jako produkt čistíren odpadních vod. [1],[2],[10]

3.1 Rozdělení topných plynů dle normy ČSN 35 5502

a) Plyny s Q_s pod 16,8 [MJ/m³]

Do této kategorie řadíme nízko výhřevné plyny např.: vysokopecní plyn, generátorový plyn, konvertorový plyn, bioplyn vznikající v čistírnách odpadů, na skládkách a směsné plyny dvou, tří a více složkové, které jsou tvořené směsí tvoří koksárenského, konvertorového, zemního a degazačního plynu. [1],[2],[10]

b) Plyny s Q_s od 16,8 [MJ/m³] do 20 [MJ/m³]

V této kategorii jsou středně výhřevné plyny např.: velmi čistý koksárenský plyn, generátorový plyn, svítiplyn ze štěpení zemního plynu, svítiplyn z tlakového zplyňování uhlí a směsné plyny zemní plyn- vzduch a propan, butan – vzduch. [1],[2],[10]

c) Plyny s Q_s od 20 [MJ/m³] do 50 [MJ/m³]

Do této kategorie patří velmi výhřevné plyny např.: zemní plyn naftový a karbonský z důlní degezace, bioplyn ze skládek odpadů. [1],[2],[10]

d) Plyny s Q_s od 50 [MJ/m³] a více

V této kategorii jsou vysoce výhřevné plyny např.: zkapalněné uhlovodíkové plyny propan, butan a jejich směsi. [1],[2],[10]

3.2 Druhy topných plynů

3.2.1 Koksárenský plyn

Koksárenský plyn je směs plynů, které je převážně tvořena vodíkem, methanem a oxidem uhelnatým (**tab.č. 3.1**), ovšem objemové podíly jednotlivých složek se mění s druhem použitého uhlí, druhu vyráběného koksu a způsobu karbonizace. Společně s kolísáním objemových složek kolísá i výhřevnost tohoto plynu, která se pohybuje okolo hodnoty 15 – 18,5 [MJ/m³]. Jedná se o hořlavý plyn, který má charakteristický zápach a vzhledem k obsahu oxidu uhelnatého je jedovatý. Koksárenský plyn vzniká, jako sekundární produkt při vysokoteplotní karbonizaci černého uhlí v koksovárnách. Vzniklý plyn je potřeba vyčistit a odsířit, aby se mohl dále využívat, přičemž se zbavujeme např. dehtu, benzolu, sulfanu, naftalenu a amoniaku. Čistý plyn se dále využívá jak pro spalování, tak i jako zdroj vodíku. [1],[2],[10]

Tabulka č.3.7 Složení koksárenského plynu

Složky koksárenského plynu	Objemový podíl složky [%]
Vodík H ₂	46 - 61
Metan CH ₄	21 – 30
Dusík N ₂	3 – 13
Oxid uhelnatý CO	5 – 8,5
Oxid uhličitý CO ₂	1 – 4
Butan C ₄ H ₁₀	1,5 – 3,5
Další plyny C _n H _m	1,5 – 3,5
Kyslík O ₂	0,4 – 1,7

3.2.2 Svítí plyn

Svítí plyn je uměle vyrobený technický plyn, který se v počátcích využíval pro osvětlování měst, díky vydávání jasně svítivému plamenu při hoření. Vyrábí se tlakovým zplyňováním hnědého uhlí, štěpením zemního nebo vzniká jako sekundární produkt vysokoteplotní karbonizace v koksárnách. Hlavní složku plynu tvoří vodík a následně je tvořen metanem, oxidem uhelnatým a dalšími plynnými složkami (**tab.č. 3.2**). Díky obsahu oxidu uhelnatého je obdobně jako koksárenský plyn jedovatý. Spalné teplo plynu se pohybuje mezi hodnotami 17 – 20 [MJ/m³]. [1],[2],[10]

Tabulka č.3.8 Složení svítiplynu

Složky svítí plynu	Objemový podíl složky [%]
Vodík H ₂	50
Metan CH ₄	25
Oxid uhelnatý CO	5
Další plyny	20

3.2.3 Vysokopecní plyn

Vysokopecní plyn vzniká jako sekundární produkt při výrobě surového železa ve vysokých pecích konkrétněji vzniká při redukčních procesech ve vysoké peci nedokonalým spálením koksu a uvolněním oxidu uhličitýho z vápence, který je součástí vsázky. Kvalita vysokopecního plynu závisí na jakosti vyráběného surového železa, na spotřebě koksu, složení vsázky a dalších faktorech ovlivňující proces vzniku vysokopecního plynu. Produkce vysokopecního plynu kolísá mezi hodnotami 1200–2000 [m³] na tunu vyrobeného surového železa. Vysokopecní plyn nemá zápach, neobsahuje téměř žádnou síru, ale je prudce jedovatý pro svůj vysoký obsah oxidu uhelnatého. Kromě vysokého obsahu oxidu uhelnatého se vysokopecní plyn skládá z dusíku, vodíku, oxidu uhličitýho (**tab.č. 3.3**) a obsahuje vysoké množství prachu ze vsázky. Po vyčištění plynu od prachu se tento plyn dále využívá v hutích pro další technologické účely, a to samostatně nebo ve směsi s plyny o vyšší výhřevnosti. Výhřevnost samostatného plynu se pohybuje mezi hodnotami 2,7-4 [MJ/m³]. [1],[2],[10]

Tabulka č.9.3 Složení vysokopecního plynu

Složky svítí plynu	Objemový podíl složky [%]
Vodík H ₂	1–5
Dusík N ₂	50-55
Oxid uhelnatý CO	20-28
Oxid uhličitý CO ₂	17-25

3.2.4 Bioplyn

Bioplyn je bezbarvý plyn, který vzniká anaerobní fermentací organických látek, tento proces využívají převážně bioplynové stanice ovšem bioplyn se získává i ze skládek odpadů nebo z čističek odpadních vod. Složení bioplynu závisí na typu organické hmoty, která se využila pro jeho výrobu např.: v bioplynových stanicích se využívají biomasa (fytomasa, hnůj a jiné odpady z živočišné a rostlinné výroby), na skládkách odpadu se produkuje bioplyn z komunálního odpadu, který je ve velkém množství organického původu. Výhřevnost vzniklého bioplynu se pohybuje v hodnotách 18-26 [MJ/m³] a to hlavně díky vysokému obsahu methanu. Další prvky, které můžeme nalézt ve složení bioplynu jsou oxid uhličitý, stopové množství dusíku, kyslíku, oxidu uhelnatého, vodíku a dalších nižších uhlovodíků (**tab.č. 3.4**). Největší využití bioplynu ať už jde o skládkový bioplyn, bioplyn z bioplynových stanic nebo bioplyn z čističek odpadních vod nalezneme v kogeneračních jednotkách, kde se za pomoci spalovacích motorů získává teplo a produkuje se elektřina, které se následně dodávají do místa jejich dalšího využití. [1],[2],[10]

Tabulka č.3.10 Složení bioplynu

Složky bioplynu	Objemový podíl složky [%]
Metan CH ₄	55-70
Oxid uhličitý CO ₂	30-45
Sirovodík H ₂ S	1-2
Dusík N ₂	0-1
Vodík H ₂	0-1
Oxid uhelnatý CO	Stopové množství
Kyslík O ₂	Stopové množství

3.3 Zemní plyn

Zemní plyn se řadí mezi fosilní paliva, je to bezbarvý, nejedovatý, výbušný plyn, jehož hlavní složku tvoří metan. Metan tvoří až 98,4 [%] složení zemního plynu, zbylé složky jsou tvořeny oxidem uhličitým, dusíkem a dalšími plyny (**tab.č. 3.5**). Obsah metanu a dalších prvků v zemním plynu je závislý na nalezišti, s tím je spojena i jeho výhřevnost, která se pohybuje mezi hodnotami 16-34 [MJ/m³]. [1],[2],[10]

Tabulka č.3.11 Složení zemního plynu

Složky zemního plynu	Objemový podíl složky [%]
Metan CH ₄	81,3 – 98,4
Ethan C ₂ H ₆	0,44 – 9
Propan C ₃ H ₈	0,16 – 2,6
Butan C ₄ H ₁₀	0,07 – 1,2
Pentan C ₅ H ₁₂	0,03 – 0,25
Dusík N ₂	0,3 – 14,3
Oxid uhličitý CO ₂	0,07 – 1,5

3.3.1 Těžba zemního plynu

Zemní plyn se získává ze země společně s ropou, uhlím nebo se těží ze samostatných ložisek. Po vytěžení je plyn potřeba upravit pro další komerční využití, tj. zbavit se přebytečné vody, sirných látek, pevných látek v palivu obsažených, aby nedocházelo ke komplikacím v distribučních systémech (např. koroze plynovodných trubek vlivem působení vody a sirných látek.) [2],[8]

3.3.2 Druhy těženého zemního plynu

Zemní plyn se po vytěžení rozděluje do několika skupin, které jsou rozděleny podle složení zemního plynu a to na:

a) Zemní plyny suché (chudé) – Obsahuje vysoké procento metanu a jen nepatrné množství vyšších uhlovodíků a nehořlavých plynů.

b) Zemní plyny vlhké (bohaté) – Obsahuje vysoké procento metanu, ovšem má vyšší podíl vyšších uhlovodíků než suchý zemní plyn.

c) Zemní plyny kyselé – Obsahují vysoké procento sulfanu H₂S, který se odstraňuje v místě těžby.

d) Zemní plyny s vyšším obsahem nehořlavých plynů – Obsahuje relativně vysoké procento dusíku a oxidu uhličitého. [2],[8]

3.3.3 Doprava zemního plynu

Přeprava zemního plynu je nejnáročnější část distribuce zemního plynu od ložiska k zákazníkovi. Hlavním důvodem je vzdálenost, kterou musí zemní plyn urazit. V dnešní době se pro přepravu zemního plynu nejčastěji využívají: [2],[8]

a) Plynovody – Jedná se o dopravu zemního plynu pomocí rozsáhlého potrubního systému, ve kterém se zemním plyn za pomoci vysokých tlaků až 10 [MPa] a průměru až 1,4 [m] dopravuje do místa spotřeby. K udržování tak vysokých tlaků se každých 100 [km] na trase plynovodu vyskytuje kompresorová stanice, které udržují hodnotu tlaku na požadované úrovni. Tyto potrubní systémy se nejčastěji nachází podzemí, ale ojediněle je můžeme najít i v nadzemním provedení. Dopravený plyn se nejprve očistí a následně uskladní v podzemních zásobnících, ze kterých se zemní plyn distribuuje k odběratelům.

b) Tankery – Před samotnou dopravou je potřeba plyn upravit do jedné ze dvou variant. První varianta je zkapalnění zemního plynu LNG, čím se sníží jeho objem až 600x a pro dopravu zkapalněného zemního plynu se využívají speciální nádrže, které drží teplotu -161 až -169 [°C]. Následně se plyn přečerpá do zásobníků, kde se postupně odpařuje a dodává se do plynovodních systémů. Druhá varianta je stlačení zemního plynu CNG.

3.3.4 Dodávky zemního plynu v Evropě

Největší dodavatelem plynu do Evropy je Rusko, které od sedmdesátých let minulého století začalo dodávat do Evropy zemní plyn pomocí dálkových plynovodů. Mezi další významné dodavatele zemního plynu pro Evropu patří také Norsko a Alžírsko. Tyto státy společně s Ruskem pokrývají 80% dodávky zemního plynu do Evropy. [2],[8]

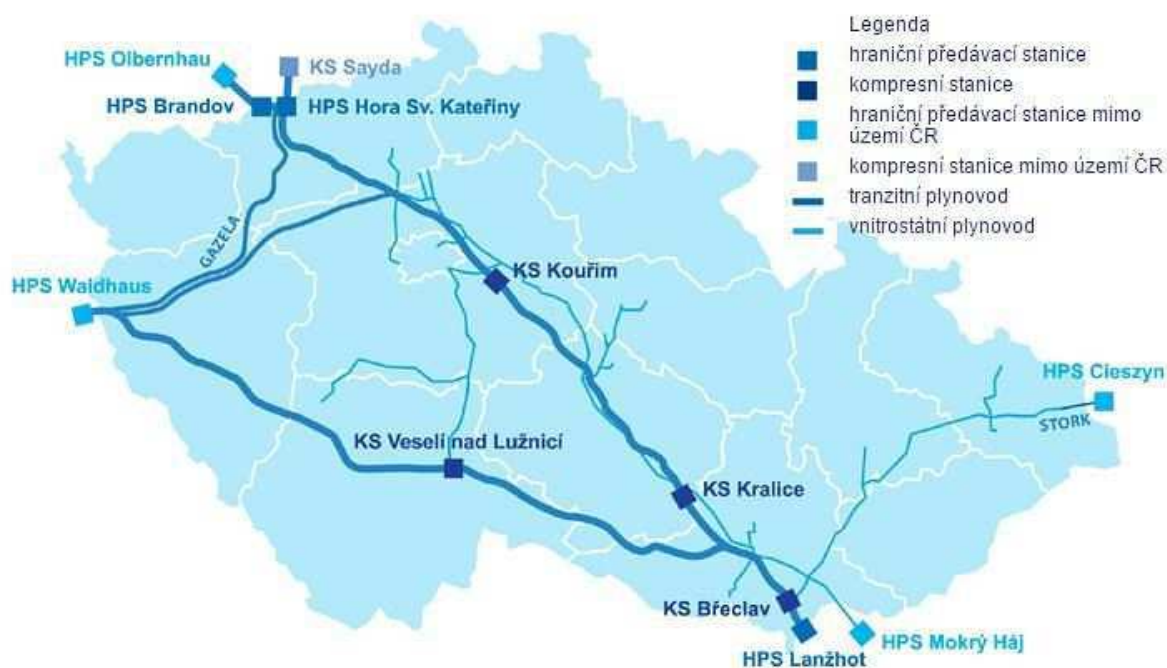
a) Rusko – Zdrojem zemního plynu v Rusku je západosibiřská oblast, kde se plyn těží a následně putuje do Evropy plynovody přes Polsko, Slovensko a Českou republiku.

b) Norsko – Zdrojem zemního plynu v Norsku je Severní moře, kde se zemním plyn po vytěžení dostává na pevninu pomocí podmořských plynovodů.

c) Alžírsko – Jedná se o největšího producenta zemního plynu na Africkém kontinentu. Dodávka zemního plynu z Alžírska se realizuje pomocí podzemních plynovodů nebo za pomoci tankerů, ve kterých se plyn dodává ve formě CNG nebo LNG.

3.3.5 Doprava zemního plynu v ČR

Spotřeba zemního plynu v ČR se pohybuje kolem 9,2 – 9,8 mld.m³, přičemž je schopna z vlastních zdrojů zajistit pouze 1 [%] spotřeby zemního plynu, a proto je ČR závislá na dovozu zemního plynu. Hlavním dodavatelem zemního plynu pro ČR je Rusko, jehož dodávka pokrývá 80 [%] spotřeby. S Ruskem, byl v roce 2006 uzavřen kontrakt do roku 2035 na dodávku 8 – 9 [mld.m³] zemního plynu. Tento plyn se do ČR dostává přes Slovensko a vstupuje do ČR přes předávací stanici v Lanžhotě. Zbylých 19 [%] nám pokrývá dovoz z Norska, s kterým byla uzavřena smlouva roku 1997 na 3 mld.m³ zemního plynu. Smlouva s Norskem nám vyprší v roce 2017. Zemní plyn z Norska je do ČR přiváděn přes Německo a jeho vstup do ČR je v předávací stanici v Hora Sv. Kateřiny. Na (obr.č. 1) jsou znázorněny předávací stanice a kompresní stanice, které udržují požadované parametry plynu v plynovodech. Provozovatelem přepravní soustavy zemního plynu v ČR je společnost NET4GAS. [2],[8]



Obrázek č.1 Trasa hlavních plynovodů v ČR

3.4 Pyrolýzní plyn

Pyrolýzní plyn vzniká při pyrolýzním procesu, kdy se za nepřístupu oxidačního média (vodní pára, vzduch) rozkládají organické složky použitého paliva v bezkyslíkové komoře. Jedná se tedy o plyn, který je převážně tvořen směsí uhlovodíků, a to od těch jednoduchých (metan, etan, etylen) až po ty složité, které nazýváme nenasycené. Dále pyrolýzní plyn může obsahovat oxid uhličitý, oxid uhelnatý, dusík a vodík. Ovšem

složení a vlastnosti pyrolýzního plynu je závislé na druhu použitého paliva a reakční teplotě, které bylo palivo vystaveno. Pro další využití je pyrolýzní plyn potřeba vyčistit a ochladit na požadovanou teplotu, přičemž se tento plyn dále využívá jako náhrada fosilních paliv nebo také se využívá jako palivo pro spalovací turbíny, kogenerační jednotky nebo spalovací motory. [11]

3.4.1 Pyrolýza

Pyrolýza je technologický proces, při kterém se za působení termické energie rozkládá organický materiál, a to bez přístupu oxidačních medií (vodní pára, vzduch). Princip pyrolýzy spočívá v ohřevu materiálu nad mez termické stability organických látek obsažených v materiálu, přičemž tento postup vede ke štěpení vysokomolekulárních látek na nízkomolekulární látky a tuhý zbytek. Produktem pyrolýzy jsou pyrolýzní oleje, plyny a tuhé zbytky. Pyrolýzní proces lze rozdělit podle dosažené teploty na: [11]

a) Nízkoteplotní (<500 [°C])

b) Středněteplotní (500 [°C] – 800 [°C])

c) Vysokoteplotní (> 800 [°C])

Při pyrolýzním procesu můžeme pozorovat řadu dějů, které jsou závislé na dosažené teplotě a rozdělují se do 3 teplotních intervalů. [11]

a) Při teplotě do 200 [°C] - Dochází k sušení materiálu a vzniku vodní páry. Do této fáze je potřeba přivést velké množství tepla z důvodu probíhání silně endotermických reakcí.

b) Mezi teplotami 200 [°C] až 500 [°C] – V rozmezí těchto teplot dochází k suché destilaci, přičemž se část bočních řetězců z vysokomolekulárních organických látek odštěpí a nastává transformace makromolekulárních struktur na plynné a kapalné organické produkty a pevný uhlík.

c) Mezi teplotami 500 [°C] – 1100 [°C] – V rozmezí těchto teplot se produkty suché destilace nadále štěpí a transformují, přičemž se z kapalných organických látek a pevného uhlíku stávají stabilní plyny (vodík, oxid uhličitý, metan).

4. Směsný plyn

Jak již bylo naznačeno, tak v mnoha průmyslových závodech vznikají sekundární produkty, u kterých se objevuje určitý energetický potenciál, který by sedal využít pro navýšení účinnosti technologických procesů. Ovšem ne všechny tyto produkty dosahují požadovaných parametrů a je potřeba upravit jejich vlastnosti, tak aby byly vyhovující pro technologie, ve kterých budou využívány. Jednou z možností této úpravy je míšení těchto plynů a vytváření nových směsných plynů, které budou splňovat požadované parametry. [1]

Směsné plyny se vytváří ve směšovací stanicích a jsou tvořeny směsí zemního, konvertorového, vysokopečního, koksárenského plynu nebo technického plynu, přičemž se jejich poměr upravuje podle požadovaných parametrů. V hutních závodech se vyskytují případy, kdy je potřeba při nedostatku určitého plynu vytvořit směs jiných dvou plynů, které budou splňovat požadované parametry. Směsné plyny můžeme dělit na: [1]

a) Dvousložkové – Nejčastěji se jedná o sloučení dvou plynů, které se využívá pro dosažení požadované výhřevnosti směsi.

b) Třísložkové – Zde se již do směsi obvykle přivádí již zmiňovaný technický plyn, který upraví vlastnosti směsného plynu (např. dusík pro snížení výbušnosti směsi)

c) Vícesložkové – Jedná se o složité směsi, kdy se postupně mísí plyny, přičemž jedna ze složek je tvořena dvousložkovým plynem.

4.1 Vlastní směsný plyn

Směsný plyn se bude skládat ze čtyř složek, a to ze zemního plynu, dusíku a pyrolýzních plynů. Zemní plyn bude tvořit hlavní složku směsného plynu, jelikož jeho vlastnosti nám dovolují spalovat pyrolýzní plyny na hořácích v kogenerační jednotce. Další podíl budou tvořit pyrolýzní plyny, které jsme získaly z pyrolýzního procesu, který probíhal za teploty 600 °C a jako palivo nám posloužily homogenní směsi materiálů na bázi polyvinylchloridu a polypropylenu. Homogenita směsí materiálů nám zajistí, že se bude jednat o pyrolýzní plyny, které budou mít podobné složení. Poslední složku směsného plynu tvoří dusík, který díky svým vlastnostem tvoří ochrannou složku, která chrání směsný plyn (např. před výbuchem).

5. Určení fyzikálních vlastností plynů

U výpočtů budeme vycházet z fyzikálních vlastností jednotlivých složek plynů, které tvoří směsný plyn (**tab.č. 5.1**). Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny za normálních podmínek, tj. tlak $p_n = 101325 \text{ [Pa]}$, teplota $t_n = 0 \text{ [°C]}$. [1]

Tabulka č. 5.1 Fyzikální vlastnosti jednotlivých složek plynů [14], [17]

Označení	Molární hmotnost M	Výhřevnost Q_i	Spalné teplo Q_s	Hustota ρ	Dyn. Viskozita η
Jednotka	[kg/kmol]	[MJ/m ³ _N]	[MJ/m ³ _N]	[kg/m ³]	[Pa.s.10 ⁻⁵]
CO	28,01	12,63	12,63	1,25	1,65
H ₂	2,02	10,78	12,75	0,09	0,84
CH ₄	16,04	35,88	39,82	0,72	1,02
C ₂ H ₄	28,05	59,46	63,41	1,25	0,947
C ₂ H ₆	30,07	64,35	70,29	1,34	0,861
C ₃ H ₆	42,08	87,58	93,58	1,88	0,781
C ₃ H ₈	44,1	93,22	101,24	1,97	0,747
C ₄ H ₁₀	58,12	123,81	134,06	2,59	0,677
C ₅ H ₁₂	72,15	156,56	169,19	3,22	0,871
CO ₂	44,01	0,00	0,00	1,96	1,37
H ₂ O	18,02	0,00	0,00	0,80	0,92
N ₂	28,01	0,00	0,00	1,25	1,66
O ₂	32	0,00	0,00	1,43	1,91
C ₄ H ₈	56,11	110,22	117,94	2,50	0,947
C ₅ H ₁₀	70,13	141,98	151,97	3,13	0,205
C ₆ H ₁₂	84,16	165,99	177,99	3,76	0,469
C ₅ H ₈	68,12	134,71	144	3,04	25,9

5.1 Objemové podíly jednotlivých složek plynu

Objemové podíly jednotlivých složek jsou udány v koncentracích $c \text{ [%]}$, ovšem pro výpočet dalších vlastností jednotlivých plynů je vhodnější uvádět objemové podíly jednotlivých složek $\omega \text{ [m}^3/\text{m}^3]$. [1]

Objemové podíly jednotlivých složek získáme ze vztahu.

$$\omega_x = \frac{V_x}{V} = \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \right] \quad (1)$$

Kdy V je objem směsi, který je roven 1 potom platí, že $V_x = \omega_x$. Z tohoto vztahu je patrné, že 1 [m³] směsi bude obsahovat právě $\omega_x \text{ [m}^3]$ složky x . V (**tab.č. 5.2**) jsou srovnány získané hodnoty.

Tabulka č. 5.2 Složení směsného plynu [14]

Složení	Zemní plyn [m ³ /m ³]	PP plyn [m ³ /m ³]	PVC plyn [m ³ /m ³]	Dusík [m ³ /m ³]
CO	0,000	0,000	0,000	0,000
H ₂	0,000	0,091	0,525	0,000
CH ₄	0,984	0,137	0,244	0,000
C ₂ H ₄	0,000	0,120	0,067	0,000
C ₂ H ₆	0,004	0,082	0,067	0,000
C ₃ H ₆	0,000	0,365	0,047	0,000
C ₃ H ₈	0,002	0,014	0,015	0,000
C ₄ H ₈	0,000	0,164	0,021	0,000
C ₄ H ₁₀	0,001	0,005	0,009	0,000
C ₅ H ₈	0,000	0,009	0,003	0,000
C ₅ H ₁₀	0,000	0,012	0,001	0,000
C ₅ H ₁₂	0,000	0,000	0,000	0,000
C ₆ H ₁₂	0,000	0,001	0,000	0,000
H ₂ O	0,000	0,000	0,000	0,000
CO ₂	0,001	0,000	0,000	0,000
N ₂	0,008	0,000	0,000	1
O ₂	0,000	0,000	0,000	0,000

5.2 Výpočet hustoty jednotlivých plynů

Hustota nám udává hmotnost 1 [m³] plynu. Podle vztahu (1) je patrné, že objem složky plynu x v 1 [m³] je roven ω_x [m³]. Hmotnost jednotlivých složek v 1 [m³] plynu získáme jako součin objemového podílu a hustoty jednotlivých složek. Celkovou hmotnost plynu získáme součtem hmotnosti jednotlivých složek. Hustotu plynu tudíž získáme jako součet součinu hustoty a objemového podílu. [1]

$$\rho_x = \sum_i \omega_{i_x} \cdot \rho_{i_x} = [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (2)$$

Kde: ω_{i_x} – Jednotlivé složky plynu [m³/m³] (tab.č. 5.2)

ρ_{i_x} – Hustota jednotlivých složek plynu [kJ/m³] (tab.č. 5.1)

a) Zemní plyn

$$\rho_{zp} = \sum_i \omega_{i_{zp}} \cdot \rho_{i_{zp}} = 0,984 \cdot 0,72 + 0,04 \cdot 1,25 + 0,002 \cdot 1,97 + \\ + 0,001 \cdot 2,59 + 0,001 \cdot 1,96 + 0,008 \cdot 1,25 = \underline{\underline{0,73}} \left[\text{kg} / \text{m}^3 \right]$$

b) PP plyn

$$\rho_{zp} = \sum_i \omega_{i_{pp}} \cdot \rho_{i_{pp}} = 0,091 \cdot 0,09 + 0,137 \cdot 0,72 + 0,12 \cdot 1,25 + \\ + 0,082 \cdot 1,34 + 0,365 \cdot 1,88 + 0,014 \cdot 1,97 + 0,164 \cdot 2,5 + \\ + 0,005 \cdot 2,59 + 0,009 \cdot 3,04 + 0,012 \cdot 3,13 + 0,001 \cdot 3,76 = \underline{\underline{1,57}} \left[\text{kg} / \text{m}^3 \right]$$

c) PVC plyn

$$\rho_{pvc} = \sum_i \omega_{i_{pvc}} \cdot \rho_{i_{pvc}} = 0,525 \cdot 0,09 + 0,244 \cdot 0,72 + 0,067 \cdot 1,25 + \\ + 0,067 \cdot 1,34 + 0,047 \cdot 1,88 + 0,015 \cdot 1,97 + 0,021 \cdot 2,5 + \\ + 0,009 \cdot 2,59 + 0,003 \cdot 3,04 + 0,001 \cdot 3,13 = \underline{\underline{0,6}} \left[\text{kg} / \text{m}^3 \right]$$

d) Dusík

$$\rho_{N_2} = \sum_i \omega_{i_{N_2}} \cdot \rho_{i_{N_2}} = 1 \cdot 1,25 = \underline{\underline{1,25}} \left[\text{kg} / \text{m}^3 \right]$$

5.3 Výpočet hutnoty jednotlivých plynů

Hutnota plynu nám udává, zda jde o plyn těžší než vzduch nebo naopak lehčí, jak vzduch. Hodnotu hutnoty plynu získáme podílem hustoty jednotlivých plynů a hustoty vzduchu. Hustota vzduchu za normálních podmínek, tj. tlak $p_n = 101325 \text{ [Pa]}$, teplota $t_n = 0 \text{ [}^\circ\text{C]}$, je rovna $\rho_{vzd} = 1,29 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. [1]

$$d = \frac{\rho_x}{\rho_{vzd}} = [-] \quad (3)$$

Kde: ρ_x – Hustota jednotlivých plynů $[\text{kg/m}^3]$ (2)

ρ_{vzd} – Hustota vzduchu $[\text{kg/m}^3]$

a) Zemní plyn

$$d = \frac{\rho_{zp}}{\rho_{vzd}} = \frac{0,73}{1,29} = \underline{\underline{0,565}}[-]$$

b) PP plyn

$$d = \frac{\rho_{pp}}{\rho_{vzd}} = \frac{1,57}{1,29} = \underline{\underline{1,21}}[-]$$

c) PVC plyn

$$d = \frac{\rho_{pvc}}{\rho_{vzd}} = \frac{0,6}{1,29} = \underline{\underline{0,46}}[-]$$

d) Dusík

$$d = \frac{\rho_{N_2}}{\rho_{vzd}} = \frac{1,25}{1,29} = \underline{\underline{0,96}}[-]$$

5.4 Výpočet výhřevnosti jednotlivých plynů

Výhřevnost Q_i [J/m³] je jedna z charakteristických vlastností paliv a udává nám, kolik energie se uvolní při dokonalém spálení jednotkového množství paliva a jeho následném ochlazení na 20 [°C] přičemž vytvořená vodní pára zůstane v plynném skupenství. V našem případě se bude jednat o energii, která se uvolní při spálení 1 [m³] plynu.

Výhřevnost se tedy bude určovat jako součet všech uvolněných energií jednotlivých složek plynů při jejich spálení, kdy známe výhřevnosti jednotlivých složek a jejich objemové podíly v 1 [m³] plynu.

Výhřevnost dusíku budeme ve výpočtech zanedbávat z důvodu jeho nulové hodnoty. [1]

$$Q_{i_x} = \sum_i \omega_{i_x} \cdot Q_{i_{i,x}} = [\text{MJ} / \text{m}^3] \quad (4)$$

Kde: ω_{i_x} – Jednotlivé složky plynu [m³/m³] (tab.č. 5.2)

Q_{i_x} – Výhřevnost jednotlivých složek plynu [MJ/m³] (tab.č. 5.1)

a) Zemní plyn

$$Q_{i_{zp}} = \sum_i \omega_{i_{zp}} \cdot Q_{i_{i,zp}} = 0,984 \cdot 35,88 + 0,004 \cdot 64,35 + 0,002 \cdot 93,22 + 0,001 \cdot 123,81 =$$

$$Q_{i_{zp}} = \underline{\underline{35,87}} \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right]$$

b) PP plyn

$$Q_{i_{pp}} = \sum_i \omega_{i_{pp}} \cdot Q_{i_{i,pp}} =$$

$$Q_{i_{pp}} = 0,091 \cdot 10,78 + 0,137 \cdot 35,88 + 0,12 \cdot 59,46 + 0,082 \cdot 64,35 + 0,365 \cdot 87,58 + \\ + 0,014 \cdot 93,22 + 0,164 \cdot 110,22 + 0,005 \cdot 123,81 + 0,009 \cdot 134,71 + 0,012 \cdot 141,98 + \\ + 0,001 \cdot 166 = \underline{\underline{73,35}} \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right]$$

c) PVC plyn

$$Q_{i_{pvc}} = \sum_i \omega_{i_{pvc}} \cdot Q_{i_{i,pvc}} = 0,525 \cdot 10,78 + 0,244 \cdot 35,88 + 0,067 \cdot 59,46 +$$

$$0,067 \cdot 64,35 + 0,047 \cdot 87,58 + 0,015 \cdot 93,22 + 0,021 \cdot 110,22 + \\ + 0,009 \cdot 123,81 + 0,003 \cdot 134,71 + 0,001 \cdot 141,98 = \underline{\underline{32,19}} \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right]$$

5.5 Výpočet spalného tepla jednotlivých plynů

Obdobně jako výhřevnost je i spalné teplo jednou z charakteristických vlastností pro palivo, která nám udává kolik energie se uvolní spálením jednotkového množství paliva a jeho následném ochlazení na 20 [°C], kdy se ovšem již počítá s kondenzací vodní páry, a proto již nesnižujeme chemickou energii o skupenské teplo vody. V našem případě se bude jednat o energii, která se uvolní při spálení 1 [m³] plynu. Výpočet bude obdobný jako výpočet pro výhřevnost plynů. [1]

Spalné teplo dusíku budeme ve výpočtech zanedbávat z důvodu jeho nulové hodnoty.

$$Q_{s_x} = \sum_i \omega_{i_x} \cdot Q_{s_{i,x}} = \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right] \quad (5)$$

Kde: ω_{i_x} – Jednotlivé složky plynu [m³/m³] (tab.č. 5.2)

Q_{s_x} – Spalné teplo jednotlivých složek plynu [MJ/m³](tab.č. 5.1)

a) Zemní plyn

$$Q_{s_{zp}} = \sum_i \omega_{i_{zp}} \cdot Q_{s_{i,zp}} = 0,984 \cdot 39,82 + 0,004 \cdot 70,29 + 0,002 \cdot 101,24 + 0,001 \cdot 134,06 =$$

$$Q_{s_{zp}} = \underline{\underline{39,8}} \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right]$$

b) PP plyn

$$Q_{s_{pp}} = \sum_i \omega_{i_{pp}} \cdot Q_{s_{i,pp}} = 0,091 \cdot 12,75 + 0,137 \cdot 39,82 + 0,12 \cdot 63,41 + 0,082 \cdot 70,29 +$$

$$+ 0,365 \cdot 93,58 + 0,014 \cdot 101,24 + 0,164 \cdot 117,94 + 0,005 \cdot 134,06 + 0,009 \cdot 144 +$$

$$+ 0,012 \cdot 151,97 + 0,001 \cdot 178 = \underline{\underline{78,87}} \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right]$$

c) PVC plyn

$$Q_{s_{pvc}} = \sum_i \omega_{i_{pvc}} \cdot Q_{s_{i,pvc}} = 0,525 \cdot 12,75 + 0,244 \cdot 39,82 + 0,067 \cdot 63,41 + 0,067 \cdot 70,29 +$$

$$+ 0,047 \cdot 93,58 + 0,015 \cdot 101,24 + 0,021 \cdot 117,94 + 0,009 \cdot 134,06 + 0,003 \cdot 144 +$$

$$+ 0,001 \cdot 151,97 = \underline{\underline{35,55}} \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right]$$

5.6 Porovnání vypočtených hodnot

V (tab.č. 5.3) jsou srovnány vypočtené hodnoty jednotlivých vlastností.

Tabulka č. 5.3 Porovnání vypočtených hodnot

Veličina	Jednotka	Zemní plyn	PP plyn	PVC plyn	Dusík
Hustota	[kg/m ³]	0,73	1,57	0,6	1,25
Výhřevnost	[MJ/m ³]	35,87	73,35	32,19	-
Spalné teplo	[MJ/m ³]	39,8	78,87	35,55	-
Hutnota	[-]	0,56	1,21	0,46	0,96

6. Určení objemových podílů směsného plynu

Při určování objemových podílů směsného plynu můžeme vycházet z několika hledisek, ale především budeme požadovat od směsného plynu, aby nám nahradil původní plyn a mohl být nadále plně využíván v dalších technologických celcích. Pro příklad uvedu dvě možnosti určení objemových podílů, přičemž v prvním budeme zachovávat stabilní výkon tím, že směsný plyn budeme mít stejnou výhřevnost jako původní plyn. Ve druhém výpočtu budeme požadovat, aby spalování směsného plynu bylo stabilní, toho dosáhneme, když směsný plyn bude mít stejné Wobbeho číslo jako původní plyn. [1]

6.1 Výpočet objemového podílu směsného plynu při zadané výhřevnosti

V tomto případě je nutné pro dobré spalování plynu navolit objemové podíly plynů tak, aby byly zachovány původní parametry hořáku. Jednoduše jde o to abychom při původním objemovém průtoku plynu hořákem dodali stejné množství tepelné energie. Tuto podmínku splníme tehdy když dosáhneme u směsného plynu původní výhřevnosti.

Ve výpočtu objemových podílů budeme vycházet z rovnic hmotové bilance, která bude vyjádřena objemovými podíly jednotlivých složek ω_i na 1 [m³] směsi.

$$\omega_{zp} + \omega_{pp} + \omega_{pvc} + \omega_{N_2} = 1 \quad (6)$$

Dále budeme určovat tepelnou (energetickou) bilanci směsi u které budeme vycházet z (4), kdy neznámou budou tvořit jednotlivé objemové podíly plynů a ostatní veličiny budou konstantní. Celková výhřevnost směsi bude rovna hodnotě původní výhřevnosti plynu $Q_{i,sp} = 36,61$ [MJ/kg].

$$\sum Q_{i,zp} \cdot \omega_{zp} + Q_{i,pp} \cdot \omega_{pp} + Q_{i,pvc} \cdot \omega_{pvc} + Q_{i,N_2} \cdot \omega_{N_2} = Q_{i,sp} \quad (7)$$

Jelikož se jedná o 4 složkový směsný plyn bude potřeba smísit nejprve dvousložkový plyn, který se bude skládat ze zemního plynu a dusíku v poměru $\omega_{zp}=0,8$ [-] a $\omega_{N_2}=0,2$ [-], a následně smísíme dvousložkový plyn se zbylými pyrolýzními plyny. V celkové hmotové bilanci bude dvousložkový plyn zastoupen ve množství $\omega_1 = 0,5$ [m³/m³]. Tím pádem se nám upraví rovnice (6) a (7).

$$\omega_1 + \omega_{pp} + \omega_{pvc} = 1 \quad (8)$$

$$Q_{i_I} \cdot \omega_I + Q_{i_{pp}} \cdot \omega_{pp} + Q_{i_{pvc}} \cdot \omega_{pvc} = Q_{i_{sp}} \quad (9)$$

Pro určení zbylých objemových podílů je potřeba řešit soustavu rovnic (8) a (9). Kdy z rovnice (8) vyjádříme ω_{pp} a dosadíme do rovnice (9).

$$\omega_{pp} = 1 - \omega_I - \omega_{pvc} \quad (10)$$

$$Q_{i_I} \cdot \omega_I + Q_{i_{pp}} \cdot (1 - \omega_I - \omega_{pvc}) + Q_{i_{pvc}} \cdot \omega_{pvc} = Q_{i_{sp}} \quad (11)$$

Po úpravách (11) získáme výsledný vztah rovnice z které dopočítáme objemový podíl ω_{pvc} z rovnice (8) a získáme zbývající podíl ω_{pp} .

$$Q_{i_I} \cdot \omega_I + Q_{i_{pp}} \cdot (1 - \omega_I - \omega_{pvc}) + Q_{i_{pvc}} \cdot \omega_{pvc} = Q_{i_{sp}} \quad (12)$$

$$Q_{i_I} \cdot \omega_I + Q_{i_{pp}} - Q_{i_{pp}} \cdot \omega_I - Q_{i_{pp}} \cdot \omega_{pvc} + Q_{i_{pvc}} \cdot \omega_{pvc} = Q_{i_{sp}}$$

$$(Q_{i_{zp}} \cdot \omega_{zp} + Q_{i_{N_2}} \cdot \omega_{N_2}) \cdot \omega_I + Q_{i_{pp}} - Q_{i_{pp}} \cdot \omega_I - Q_{i_{pp}} \cdot \omega_{pvc} + Q_{i_{pvc}} \cdot \omega_{pvc} = Q_{i_{sp}}$$

$$\omega_{pvc} = \frac{Q_{i_{sp}} - (Q_{i_{zp}} \cdot \omega_{zp} + Q_{i_{N_2}} \cdot \omega_{N_2}) \cdot \omega_I - Q_{i_{pp}} + Q_{i_{pp}} \cdot \omega_I}{(Q_{i_{pvc}} - Q_{i_{pp}})} = [m^3 / m^3]$$

Kde: ω_{ix} – Jednotlivé složky směsného plynu $[m^3/m^3]$

Q_{ix} – Výhřevnost jednotlivých složek směsi $[MJ/m^3]$ (tab.č. 5.3)

$$\omega_{pvc} = \frac{36,61 - (35,87 \cdot 0,8 + 0 \cdot 0,2) \cdot 0,5 - 73,35 + 73,55 \cdot 0,5}{(32,19 - 73,55)} = \underline{\underline{0,365}} [m^3 / m^3]$$

Výsledek dosadíme do rovnice (10) a získáme objemový podíl zbývajících složky.

$$\omega_{pp} = 1 - \omega_I - \omega_{pvc}$$

Kde: ω_I, ω_{pvc} – Jednotlivé složky směsného plynu $[m^3/m^3]$

$$\omega_{pp} = 1 - 0,5 - 0,365 = \underline{\underline{0,135}} \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \right]$$

6.1.1 Srovnání vypočtených hodnot

V (tab.č. 6.1) jsou srovnány vypočtené hodnoty.

Tabulka č.6.1 Objem. podíly jednot. plynů ve směs. plynu při zadané výhřevnosti

Veličina	Jednotka	Zemní plyn	PP plyn	PVC	Dusík
Objem. podíl	[m ³ /m ³]	0,4	0,135	0,365	0,1

6.2 Wobbeho číslo

Wobbeho číslo se řadí mezi kritériální veličiny, které nám vyhodnocují záměnnost topných plynů, z toho posléze vyplývá, zda se bude jednat o efektivní výměnu plynu vzhledem k jeho dopadu na spalovací zařízení.

Wobbeho číslo nám slouží k posouzení, zda je náhradní plyn schopen zachovat stabilitu hoření při svých parametrech. Rozlišujeme nižší a vyšší Wobbeho číslo, přičemž se nižší Wobbeho číslo vypočte jako podíl výhřevnosti plynu a jeho hutnoty. [1]

$$W_{n,n} = \frac{Q_{i,sp,f}}{\sqrt{d}} = \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right] \quad (13)$$

A vyšší Wobbeho číslo se vypočte jako podíl spalného tepla plynu a jeho hutnoty.

$$W_{n,v} = \frac{Q_{s,sp,f}}{\sqrt{d}} = \left[\text{MJ} / \text{m}^3 \right] \quad (14)$$

6.3 Výpočet objemového podílu směs. plynu při zadaném Wobbeho čísle

Jak již bylo zmíněno, tak Wobbeho číslo je parametr směsného plynu, který se využívá pro určování záměnnosti topných plynů. Proto při výpočtu budeme předpokládat, že hodnota Wobbeho čísla směsného plynu se bude od hodnoty původního plynu lišit o ± 5 [%] a právě tento předpoklad by nám měl zajistit, již zmiňovanou stabilitu hoření. Wobbeho číslo směsného plynu se bude pohybovat okolo hodnoty **$W_{n,sp,f} = 52,9$ [MJ/m³]**.

Při výpočtu budeme vycházet z následující rovnice, kdy budeme uvažovat, že výsledné Wobbeho číslo se vypočte, jako součet součinů jednotlivých objemových podílů a Wobbeho čísel pro jednotlivé plyny. [1]

$$W_{n,sp,f} = \sum \omega_x \cdot W_{n,x} = [MJ / m^3] \quad (15)$$

Následně do rovnice (15) dosadíme rovnici (13), přičemž zachováme hodnotu Wobbeho čísla pro směsný plyn.

$$W_{n,sp,f} = \sum \omega_x \cdot \frac{Q_{s_x}}{\sqrt{d_x}} = [MJ / m^3] \quad (16)$$

Rovnici upravíme.

$$W_{n,sp,f} = \omega_{zp} \cdot \frac{Q_{s_{zp}}}{\sqrt{d_{zp}}} + \omega_{pp} \cdot \frac{Q_{s_{pp}}}{\sqrt{d_{pp}}} + \omega_{pvc} \cdot \frac{Q_{s_{pvc}}}{\sqrt{d_{pvc}}} + \omega_{N_2} \cdot \frac{Q_{s_{N_2}}}{\sqrt{d_{N_2}}} = [MJ / m^3] \quad (17)$$

Z rovnice (6) si vyjádříme ω_{pp} , přičemž obdobně, jako v předchozím výpočtu budeme nejprve mísit zemní plyn a dusík s tím, že tento dvousložkový plyn tvoří 50 [%] objemu směsného plynu. Zemní plyn bude tvořit 40 [%] a dusík 10 [%] objemu směsného plynu.

$$\omega_{pp} = 0,5 - \omega_{pvc} \quad (18)$$

Dosadíme do rovnice (17) a upravíme a získáme ω_{pvc} .

$$\begin{aligned} W_{n,sp,f} &= \omega_I \cdot \frac{Q_{s_I}}{\sqrt{d_I}} + (0,5 - \omega_{pvc}) \cdot \frac{Q_{s_{pp}}}{\sqrt{d_{pp}}} + \omega_{pvc} \cdot \frac{Q_{s_{pvc}}}{\sqrt{d_{pvc}}} = \\ W_{n,sp,f} &= \omega_{zp} \cdot \frac{Q_{s_{zp}}}{\sqrt{d_{zp}}} + \frac{Q_{s_{pp}}}{2 \cdot \sqrt{d_{pp}}} - \frac{Q_{s_{pp}}}{\sqrt{d_{pp}}} \cdot \omega_{pvc} + \omega_{pvc} \cdot \frac{Q_{s_{pvc}}}{\sqrt{d_{pvc}}} = \\ W_{n,sp,f} - \omega_I \cdot \frac{Q_{s_I}}{\sqrt{d_I}} - \frac{Q_{s_{pp}}}{2 \cdot \sqrt{d_{pp}}} &= \omega_{pvc} \cdot \left(\frac{Q_{s_{pvc}}}{\sqrt{d_{pvc}}} - \frac{Q_{s_{pp}}}{\sqrt{d_{pp}}} \right) \\ \omega_{pvc} &= \frac{W_{n,sp,f} - \omega_I \cdot \frac{Q_{s_I}}{\sqrt{d_I}} - \frac{Q_{s_{pp}}}{2 \cdot \sqrt{d_{pp}}}}{\frac{Q_{s_{pvc}}}{\sqrt{d_{pvc}}} - \frac{Q_{s_{pp}}}{\sqrt{d_{pp}}}} \end{aligned} \quad (19)$$

Kde: ω_x – Jednotlivé složky směsného plynu $[m^3/m^3]$
 Q_{s_x} – Výhřevnost jednotlivých složek směsi $[MJ/m^3]$ (tab.č. 5.3)
 d_x – Hutnoty jednotlivých složek $[-]$ (tab.č. 5.3)

$W_{n,sp}$ – Wobbeho číslo směsného plynu [MJ/m³]

$$\omega_{pvc} = \frac{W_{n,sp,f} - \omega_I \cdot \frac{Q_{s_I}}{\sqrt{d_I}} - \frac{Q_{s_{pp}}}{2 \cdot \sqrt{d_{pp}}}}{\frac{Q_{s_{pvc}}}{\sqrt{d_{pvc}}} - \frac{Q_{s_{pp}}}{\sqrt{d_{pp}}}} = \frac{W_{n,sp,f} - \omega_I \cdot \frac{(0,8 \cdot Q_{s_{zp}} + 0,2 \cdot Q_{s_{N_2}})}{(0,8 \cdot \sqrt{d_{zp}} + 0,2 \cdot \sqrt{d_{N_2}})} - \frac{Q_{s_{pp}}}{2 \cdot \sqrt{d_{pp}}}}{\frac{Q_{s_{pvc}}}{\sqrt{d_{pvc}}} - \frac{Q_{s_{pp}}}{\sqrt{d_{pp}}}}$$

$$\omega_{pvc} = \frac{52,9 - 0,5 \cdot \frac{(0,8 \cdot 39,8)}{(0,8 \cdot \sqrt{0,565} + 0,2 \cdot \sqrt{0,96})} - \frac{78,87}{2 \cdot \sqrt{1,21}}}{\frac{78,87}{\sqrt{1,21}} - \frac{35,55}{\sqrt{0,46}}} = \underline{\underline{0,15}} [-]$$

Výsledek dosadíme do rovnice (18) a dopočítáme zbývajících objemový podíl směsného plynu.

$$\omega_{pp} = 0,5 - \omega_{pvc}$$

Kde: ω_{pvc} – Objemový podíl PVC plynu ve směs. plyn. [m³/m³]

$$\omega_{pp} = 0,5 - 0,15 = \underline{\underline{0,35}} [-]$$

6.3.1 Srovnání vypočtených hodnot

Tabulka č. 6.2 Objem. podíly jednot. plynů ve směs. plynu při zadaném Wobb. č.

Veličina	Jednotka	Zemní plyn	Pyr. plyn	PVC	Dusík
Objem. podíl	[m ³ /m ³]	0,4	0,15	0,35	0,1

7. Rozvody plynů před směšovací stanicí

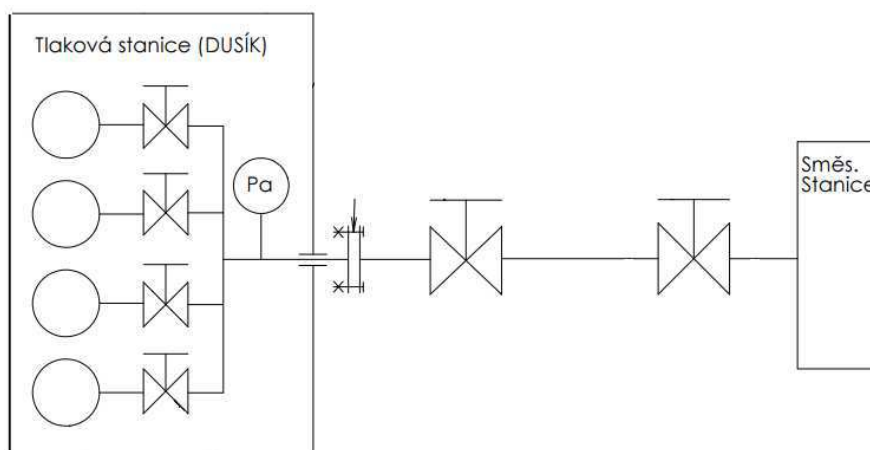
Směšovací stanice jsou technologické zařízení, které nám slouží k míšení různých druhů plynů, přičemž výsledným produktem je tzv. směsný plyn. V našem konkrétním případě budeme mísit PVC plyn, PP plyn, zemní plyn a dusík. Míšení bude probíhat v ocelovém kontejneru, do kterého jsou přivedeny již zmiňované plyny z různých technologických procesů. Jednotlivé rozvody jsou dělány na základě technické zprávy [12].

7.1 Přívod dusíku do směšovací stanice

Jako zdroj dusíku nám poslouží tlaková stanice, která obsahuje celkem osm zdrojových lahví, přičemž jsou čtyři provozní a zbylé čtyři slouží jako záložní zdroje dusíku. Tlakové lahve mají provozní tlak 200 [bar] a objem 50 [l].

Dusík budeme získávat za pomoci vyvíječe dusíku. Toto zařízení pracuje na principu střídavé tlakové adsorpce a je schopno oddělit molekuly dusíku od zbylých plynných složek. Tento proces probíhá na karbonových molekulových sítích, které díky svému povrchu, tj. fyzikálně – chemickou cestou, dokáží zadržet všechny molekuly tvořící vzduch, to zahrnuje i molekuly dusíku, které prochází na výstupu z věže. Čím déle setrvá vzduch v kontaktu s karbonovými sítí, tím je větší čistota plynu. Generátor dusíku obsahuje dvě věže, které střídavě pracují, přičemž jedna z věží je aktivní a druhá tzv. regeneruje a zbavuje se adsorbovaných molekul na molárním sítě. Pro správné fungování této technologie je potřeba zajistit, aby se do generátoru dostával, co možná nejčistší vzduch, proto je generátor vybaven filtry a sušičkami, které nám zajistí, že vzduch bude zbaven tuhých nečistot a vlhkosti. Takto čistý vzduch pokračuje do kompresoru, kde se stlačí na požadovaný provozní tlak dusíkového generátoru. Tlakový vzduch a získaný dusík se uskládňují v tlakových nádobách. Odpadní plyny, které jsou tvořeny kyslíkem a ostatními vzácnými plyny jsou vypouštěny zpět do atmosféry. Čistota dusíku bude dosahovat 99,5 [%] z toho důvodu, aby docházelo ke správnému spalování směsného plynu na kogenerační jednotce. Přetlak dusíku na vstupu do směšovací stanice bude 50 [kPa], přičemž jeho teplota se bude pohybovat okolo 20 [°C]. Celá soustava na získávání dusíku bude umístěna v ocelovém kontejneru, přičemž na střeše kontejneru bude umístěna sací a výfuková potrubí. Dusíkový vyvíječ bude možno ovládat přímo z kontejneru nebo z velínu.

Doprava dusíku do směšovací stanice je zajištěna ze čtyř tlakových lahví, které jsou opatřeny redukčními ventily nastavených na 65 [kPa]. Jednotlivé tlakové lahve jsou propojeny potrubím DN25 PN6, přičemž jsou jednotlivé odběry řízené za pomoci kulových uzavíracích kohoutů. Před výstupem z tlakové stanice je potrubí opatřeno tlakoměrem a samotný výstup z tlakové stanice je zajištěn za pomoci zatěsněné chráničky DN100, kde je potrubí zakončeno přírubovým spojem. Na přírubový spoj navazuje kulový uzavírací kohout a následně potrubí sestupuje do země. Před směšovací stanicí vystupuje potrubí ze země a je opatřeno kulovým uzavíracím kohoutem. Propojení se směšovací stanicí je realizováno za pomoci plynové hadice DN25. Na **(obr.č. 2)** je uvedeno jednoduché schéma rozvodu. Kompletní schéma rozvodu je uvedené v **příloze č.1.**



Obrázek č.2 Schéma dusíkového rozvodu do směšovací stanice

7.2 Přívod zemního plynu do směšovací stanice

Rozvod zemního plynu je napojen na HUP (hlavní uzávěr plynu) s měřícím zařízením na hranici pozemku. Jedná se o středotlaký plynovod, který dosahuje tlaku 65–70 [kPa] a teplota zemního plynu se pohybuje okolo hodnoty 20 [°C]. Na stávající kulový kohout v HUP o dimenzi DN50 je napojeno plynové potrubí DN50 PN6, které zásobuje směšovací stanicí zemním plynem. Potrubí je vedeno pod zemí a před směšovací stanicí vystupuje ze země a je uzavřeno kulovým uzavíracím kohoutem. Propojení se směšovací stanicí je realizováno pomocí plynové hadice DN50. Podzemní potrubí je z materiálu PE100 třídy SDR17,6 a nadzemní potrubí je z oceli. Přechod z PE potrubí na ocel je realizován pomocí přechodového spoje. Na **(obr.č. 3)** je uvedeno jednoduché schéma rozvodu. Kompletní schéma rozvodu je uvedené v **příloze č.2.**



Obrázek č.3 Schéma rozvodu zemního plynu do směšovací stanice

7.3 Přívod PVC a PP plynů do směšovací stanice

PVC a PP plynu vznikají v pyrolýzní jednotce, odkud jsou tyto plyny stlačovány dmychadlem na tlak 20 [kPa] a potrubím DN50 PN6 jsou dopraveny do technologie čištění pyrolýzních plynů. Po vyčištění je u plynů vyrovnána difference tlaků za pomoci dmychadla a jdou do rozdělovací tratě, která je osazena kulovými uzavíracími kohouty, které zaručí, že se jednotlivý pyrolýzní plyny dostanou do nízkotlakých podzemních plynojemů určených pro daný plyn. V potrubí plyny prochází filtrem, tlakoměrem, teploměrem a ultrazvukovým plynoměrem pro měření průtoku. Pro případ demontáže plynoměru, jsou před a za plynoměrem osazeny uzavírací kulové kohouty, které vytváří bypass a zaručí nám provoz potrubí i v případě demontáže plynoměru. Z jednotlivých větví směřujících do plynojemů jsou vyvedeny odbočky DN50 PN6 osazené uzavíracími kulovými kohouty, která jsou napojeny na hořák zbytkového plynu. Ve větvích jsou dále usazeny hlavní uzávěry pyrolýzního plynu a potrubí dále pokračuje v podzemí až do levých hrdel nízkotlakých zásobníků přes uzavírací kulové kohouty v dimenzi DN50 PN6. Pyrolýzní plyny jsou dále ze středních hrdel zásobníků vedeny potrubím DN50 PN6 (uloženém v zemi) přes uzavírací kulové kohouty do kompresorů středotlakého zásobníku. V případě dosažení plného objemu zásobníků se plyn vede potrubím DN50 PN6 (umístěným v zemi) do hořáku zbytkového plynu přes uzavírací kohout a zpětnou klapku. Celkový objem nízkotlakých plynojemů je 30 [m³].

Z nízkotlakého plynojemů putují pyrolýzní plyny do 2. stupňové komprese, která stlačuje plyny na hodnoty až 800 [kPa]. Ve výtlakných potrubích DN50 PN10 měříme tlak a teplotu plynů v potrubí. Kompresory jsou chlazené samostatným chladicím oběhem, který se skládá z elektrického oběhového čerpadla, nádrže a propojovacího potrubí. V chladicím oběhu měříme teplotu, tlak a průtok, přičemž se tyto hodnoty odesílají na velín. Propojení mezi pyrolýzními plyny a kompresory je realizováno za

pomoci plynových hadic s kovovým opletem. Výstupní potrubí DN50 PN10 z kompresorů jsou vedena v zemi na levé vstupy na hrdlech středotlakých podzemních zásobníků přes uzavírací kulové kohout DN50. Ze středních hrdel středotlakých zásobníků jsou vyvedeny potrubí DN50/DN32 PN10 (v zemi) přes uzavírací kulové kohouty, regulátory tlaku seřízených na 70/60 [kPa] a uzavírací kulové kohouty, až ke kontejneru směšovací stanice. Po vystoupení ze země jsou potrubí osazena uzavíracími kulovými kohouty. Propojení pyrolýzních plynů a směšovací stanice je realizováno za pomoci plynových hadic. Při plném zaplnění středotlakého zásobníku pyrolýzním plynem je pyrolýzní plyn veden v zemi potrubím DN50 PN10 přes uzavírací kulový kohout, regulátor tlaku seřízený na 20 [kPa] a uzavírací kulový kohout na hořák zbytkového plynu. Celkový objem středotlakých zásobníků je 30 [m³]. Schéma rozvodu je uvedené v **příloze č.3**.

7.3.1 Čištění a chlazení pyrolýzního plynu

Čištění pyrolýzního plynu je zajištěno z důvodu snížení dehtu a jiných nežádoucích sloučenin, které tento plyn obsahuje. Pro čištění plynu se bude využívat filtračních zařízení a mokré vypírky, přičemž tyto zařízení budou osazeny uzavíracími armaturami, které nám zajistí provoz v různých systémech zapojení. Součástí tohoto systému jsou i měřiče tlaku, teploty a průtoku plynu. Proces čištění pyrolýzních plynů bude ovládáno z velínu nebo za pomoci ovládacího panelu umístěného vedle jednotky.

Chlazení pyrolýzních plynů bude probíhat ve třech stupních, kdy první stupeň bude ve výměníku vzduch/plyn a dále bude ochlazený plyn pokračovat do dvou stupňů, které budou ochlazovat pyrolýzní plyn vodou. Bude se tedy jednat o výměníky typu voda/plyn. Na výstupu bude plyn zchlazený na teplotu, která nám zaručí, že plyn nebude v potrubních rozvodech kondenzovat.

7.3.2 Hořák zbytkového plynu

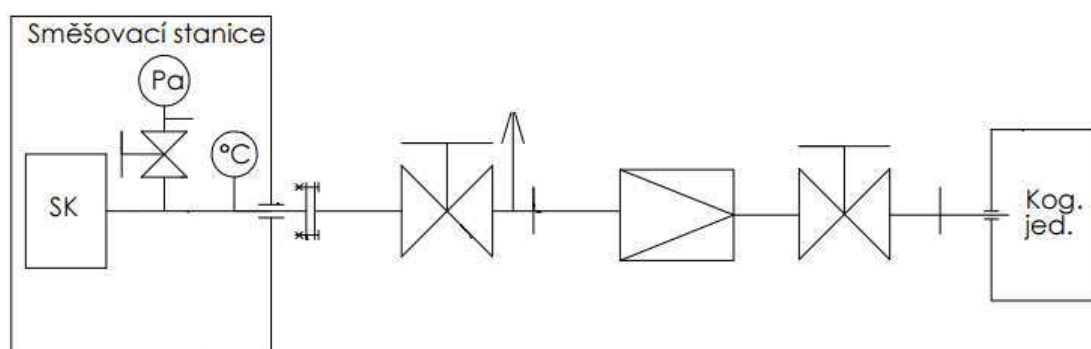
Hořák zbytkového plynu je zařízení, které slouží ke spalování pyrolýzních plynů, a to v případě, že dojde k poruše některého z plynojemů nebo se jedná o již zmiňovaný případ přebytku pyrolýzního plynu v plynojemech.

Zařízení je umístěno na oplocené betonové ploše, která je umístěna před halou s pyrolýzní jednotkou. Potrubí pyrolýzních plynů DN50 PN6(10), které vedou do hořáku,

jsou osazeny uzavíracími kulovými kohouty. Pro zajištění provozu hořáku jsou do hořáku přivedeny potrubí se zemním plynem a tlakovým vzduchem.

7.4 Výstup směsného plynu ze směšovací stanice

Směsný plyn vystupující ze směšovací komory je veden potrubím přes tlakoměr s uzavíracím kulovým kohoutem s možností napojení snímače tlaku a teploměr pro měření teploty. Následně potrubí pokračuje přes stěnu kontejneru zatěsněnou chráničkou DN100 a je zakončeno přírubou, na kterou navazuje plynová hadice, která vede na uzavírací kulový kohout. Na kulový kohout navazuje potrubí DN80, z kterého je vyvedena odbočka pro odběr vzorku, a potrubí dále pokračuje do podzemního vedení, které je napojena na regulátor tlaku, který je seřízen na tlak 5 [kPa], a uzavírací kulový kohout. Potrubí následně vystupuje ze země do kogenerační stanice přes zatěsněnou chráničku DN100. Na **(obr.č. 4)** je uvedeno jednoduché schéma rozvodu. Kompletní schéma rozvodu je uvedené v **příloze č.4**.



Obrázek č.4 Schéma rozvodu směšovacího plynu do kogenerační jednotky

7.5 Provozní parametry jednotlivých plynů

V **(tab.č. 7.1)** jsou shrnuty provozní parametry jednotlivých plynů při vstupu do směšovací stanice.

Tabulka č.12.1 Provozní parametry jednotlivých plynů

Veličina	Jednotka	Zemní plyn	PP plyn	PVC plyn	Dusík
Tlak	[kPa]	70	60	70	65
Teplota	[°C]	20	50	50	20

8. Návrh směšovací stanice

Při návrhu směšovací stanice budeme vycházet z technických vlastností kogenerační jednotky Quanto D3000 od společnosti TEDOM a.s., které jsou uvedeny v (tab.č. 8.1) a provozních parametrů jednotlivých plynů (tab.č. 7.1), které vstupují do směšovací stanice.

Tabulka č. 8.1 Technické parametry kogenerační jednotky Quanto D3000 [13]

	Elektrický výkon	Tepelný výkon		Elektrická účinnost	Tepelná účinnost		Celková účinnost	
		Standartní	Zvýšený		Standartní	Zvýšený	Standartní	Zvýšený
Jednotka	[kW]	[kW]		[%]	[%]		[%]	
Hodnota	3333	3577	3740	43,6	46,8	48,9	90,3	92,5

8.1 Objemový průtok finálního směsného plynu

Velikost objemového průtoku budeme počítat z technických parametrů kogenerační jednotky a výhřevnosti směsného plynu, konkrétněji se bude jednat o podíl tepelného výkonu kogenerační jednotky a výhřevnosti směsného plynu. Matematicky tento vztah vyjádříme následovně. [1]

$$\dot{V}_{n,sp,f} = \frac{P}{Q_{i,sp}} = \left[m^3 / s \right] \quad (20)$$

Kde: P – Přenášený tepelný výkon [kW] (tab.č. 8.1)

$Q_{i,sp}$ – Výhřevnost směsného plynu [kJ/m³]

$$\dot{V}_{n,sp,f} = \frac{3577}{36610} = 0,097 \left[m^3 / s \right] = 349,2 \left[m^3 / hod \right]$$

8.1.1 Výhřevnost finálního směsného plynu

U výpočtu výhřevnosti směsného plynu budeme vycházet z rovnice (4), kdy se celková výhřevnost směsného plynu určí jako součin součtů objemových podílů jednotlivých plynů ve směsném plynu podle (tab.č. 6.2) a výhřevnosti jednotlivých plynů.

$$Q_{i,sp,f} = \sum_i \omega_{i,x} \cdot Q_{i,i,x} = \left[MJ / m^3 \right] \quad (21)$$

Kde: $\omega_{i,x}$ – Objemový podíl jedno. složek směs. p. [m³/m³](tab.č. 6.2)

Q_{i_x} – Výhřevnost jednotlivých složek směs. p. [MJ/m³](tab.č. 5.3)

$$Q_{i_{sp,f}} = \omega_{zp} \cdot Q_{i_{zp}} + \omega_{pp} \cdot Q_{i_{pp}} + \omega_{pvc} \cdot Q_{i_{pvc}} + \omega_{N_2} \cdot Q_{i_{N_2}} =$$

$$Q_{i_{sp,f}} = 0,4 \cdot 35,87 + 0,15 \cdot 73,35 + 0,35 \cdot 32,19 + 0,1 \cdot 0 = \underline{\underline{36,61}} \text{ [MJ / m}^3 \text{]}$$

8.2 Objemový průtok před míšeného plynu

Ve směšovací stanici bude docházet k před míšení zemního plynu s dusíkem v poměru $x_{zp} = 0,8$ [-] a $x_{N_2} = 0,2$ [-], čímž se získá směsný plyn, který podle **kap. 6.3** tvoří 50 [%] finálního směsného plynu.

$$\dot{V}_{n,sp} = 0,5 \cdot \dot{V}_{n,sp} = \text{[m}^3 \text{ / hod]} \quad (22)$$

Kde: $\dot{V}_{n,sp}$ – Objemové průtok směsného plynu [m³/hod](20)

$$\dot{V}_{n,sp} = 0,5 \cdot 0,097 = \underline{\underline{0,0485}} \text{ [m}^3 \text{ / s]} = \underline{\underline{174,6}} \text{ [m}^3 \text{ / hod]}$$

8.3 Objemové průtoky směsných plynů při provozních parametrech

Směsný plyn, který vznikne před míšením zemního plynu a dusíku bude mít na výstupu ze směšovací komory tlak $p_{sp} = 60$ [kPa] a teplotu $t_{sp} = 20$ [°C].

Finální směsný plyn bude vycházet ze směšovací stanice při určitých parametrech, konkrétněji bude mít tlak $p_{sp,f} = 50$ [kPa] a jeho teplota se bude pohybovat okolo $t_{sp,f} = 30$ [°C].

Díky těmto parametrům se nám změní hodnoty objemových průtoků. Tuto změnu oproti normálním podmínkám vyjádříme za pomoci stavové rovnice. [1]

$$\frac{p_{sk,x} \cdot \dot{V}_{sk,x}}{T_{sk,x}} = \frac{p_n \cdot \dot{V}_{n,x}}{T_n} \quad (23)$$

Z rovnice si vyjádříme neznámou $\dot{V}_{sk,x}$.

$$\dot{V}_{sk,x} = \dot{V}_{n,sp} \cdot \frac{p_n}{p_{sk,x}} \cdot \frac{T_{sk,x}}{T_n} = \text{[m}^3 \text{ / s]} \quad (24)$$

Kde:	$V_{n,x}$ – Objemový průtok za normálních podmínek	$[m^3/s]$ (20),(22)
	p_n – Tlak za normálních podmínek	$[Pa]$
	$p_{sk,x}$ – Absolutní tlak v potrubí	$[Pa]$
	$T_{sk,x}$ – Skutečná teplota v potrubí	$[°C]$
	T_n – Teplota za normálních podmínek	$[°C]$

a) Směsný plyn (zemní plyn + dusík)

$$V_{sk,sp} = 0,0485 \cdot \frac{101325}{161325} \cdot \frac{(273,15 + 20)}{273,15} = \underline{\underline{0,033}} [m^3 / s] = \underline{\underline{118,8}} [m^3 / hod]$$

b) Finální směsný plyn

$$V_{sk,sp,f} = 0,097 \cdot \frac{101325}{151325} \cdot \frac{(273,15 + 30)}{273,15} = \underline{\underline{0,072}} [m^3 / s] = \underline{\underline{259}} [m^3 / hod]$$

8.4 Objemové průtoky plynů před směšovací komorou

Jelikož vycházíme z technických parametrů kogenerační jednotky bude pro nás výhodnější počítat se směšovacím poměrem podle Wobbeho čísla, a to z toho důvodu, že tímto poměrem dosáhneme stabilnějšího hoření plamene.

Z **kap. 8.1** vyplynulo, že pro zajištění pokrytí tepelného výkonu musíme do kogenerační jednotky přivést množství $V_{n,sp,f}$ plynu. Pro zajištění požadované dodávky plynu budeme do směšovací komory přivádět jednotlivé plyny v již zmiňovaném směšovacím poměru dle Wobbeho čísla. Velikosti jednotlivých objemových průtoků vypočteme na základě vztahu (1). [1]

$$\omega_x = \frac{V_{n,x}}{V_{n,sp}} \Rightarrow V_{n,x} = \omega_x \cdot V_{n,sp} = [m^3 / s] \quad (25)$$

Kde: $V_{n,x}$ – Objemový průtok směs. plynu za norm. p. $[m^3/s]$ (18)

ω_x – Objemové podíly jednotlivých plynů dle W.č. [-] (tab.č. 6.2)

a) Zemní plyn

$$V_{n,zp} = \omega_{zp} \cdot V_{n,sp} = 0,8 \cdot 0,0485 = \underline{\underline{0,039}} \left[\text{m}^3 / \text{s} \right] = \underline{\underline{140,4}} \left[\text{m}^3 / \text{hod} \right]$$

b) PP plyn

$$V_{n,pp} = \omega_{pp} \cdot V_{n,sp,f} = 0,15 \cdot 0,097 = \underline{\underline{0,015}} \left[\text{m}^3 / \text{s} \right] = \underline{\underline{54}} \left[\text{m}^3 / \text{hod} \right]$$

c) PVC plyn

$$V_{n,pvc} = \omega_{pvc} \cdot V_{n,sp,f} = 0,35 \cdot 0,097 = \underline{\underline{0,033}} \left[\text{m}^3 / \text{s} \right] = \underline{\underline{118,8}} \left[\text{m}^3 / \text{hod} \right]$$

d) Dusík

$$V_{n,N_2} = \omega_{N_2} \cdot V_{n,sp} = 0,2 \cdot 0,0485 = \underline{\underline{0,01}} \left[\text{m}^3 / \text{s} \right] = \underline{\underline{36}} \left[\text{m}^3 / \text{hod} \right]$$

8.5 Objemové průtoky plynů před směš. kom. při provozních parametrech

Jednotlivé plyny budou do směšovací komory přicházet z různých technologií, které upraví jejich technické parametry, a to konkrétněji jejich teplotu a tlak (**tab.č. 7.1**). Tyto změny teploty a tlaku se projeví na jejich schopnosti dodávky energie do systému, přičemž tuto změnu můžeme vyjádřit obdobně jako v rovnici (24). [1]

$$\dot{V}_{sk,x} = \dot{V}_{n,x} \cdot \frac{p_n}{p_{sk,x}} \cdot \frac{T_{sk,x}}{T_n} = \left[\text{m}^3 / \text{s} \right] \quad (26)$$

Kde: $V_{n,x}$ – Objemový průtok za normálních podmínek $[\text{m}^3/\text{s}]$ (25)

p_n – Tlak za normálních podmínek [Pa]

$p_{sk,x}$ – Absolutní tlak v potrubí [Pa] (tab.č. 7.1)

$T_{sk,x}$ – Skutečná teplota v potrubí [°C] (tab.č. 7.1)

T_n – Teplota za normálních podmínek [°C]

a) Zemní plyn

$$\dot{V}_{sk,zp} = \dot{V}_{n,zp} \cdot \frac{p_n}{p_{sk,zp}} \cdot \frac{T_{sk,zp}}{T_n} = 0,039 \cdot \frac{101325}{171325} \cdot \frac{(273,15 + 20)}{273,15} = \underline{\underline{0,026}} [\text{m}^3 / \text{s}] = \underline{\underline{93,6}} [\text{m}^3 / \text{hod}]$$

b) PP plyn

$$\dot{V}_{sk,pp} = \dot{V}_{n,pp} \cdot \frac{p_n}{p_{sk,pp}} \cdot \frac{T_{sk,pp}}{T_n} = 0,015 \cdot \frac{101325}{161325} \cdot \frac{(273,15 + 50)}{273,15} = \underline{\underline{0,011}} [\text{m}^3 / \text{s}] = \underline{\underline{39,6}} [\text{m}^3 / \text{hod}]$$

c) PVC plyn

$$\dot{V}_{sk,pvc} = \dot{V}_{n,pvc} \cdot \frac{p_n}{p_{sk,pvc}} \cdot \frac{T_{sk,pvc}}{T_n} = 0,033 \cdot \frac{101325}{171325} \cdot \frac{(273,15 + 50)}{273,15} = \underline{\underline{0,026}} [\text{m}^3 / \text{s}] = \underline{\underline{93,6}} [\text{m}^3 / \text{hod}]$$

d) Dusík

$$\dot{V}_{sk,x} = \dot{V}_{n,x} \cdot \frac{p_n}{p_{sk,x}} \cdot \frac{T_{sk,x}}{T_n} = 0,01 \cdot \frac{101325}{166325} \cdot \frac{(273,15 + 20)}{273,15} = \underline{\underline{0,007}} [\text{m}^3 / \text{s}] = \underline{\underline{25,2}} [\text{m}^3 / \text{hod}]$$

8.6 Průměr potrubí za směšovacími komorami

Při navrhování průměru potrubí si nejprve musíme navolit hodnotu doporučené rychlosti proudění v potrubí, která se pohybuje v rozmezí 10–15 [m/s].

Při samotné výpočtu již budeme vycházet z objemového průtoku plyn a zvolené rychlosti, přičemž navolená rychlost plynu bude rovna **v = 15 [m/s]**. Vypočtený průměr potrubí následně zaokrouhlíme na nejbližší průměr potrubí, který bude odpovídat normě ČSN 42 5715. [1]

$$\dot{V}_{sk,x} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot v = [\text{m}^3 / \text{s}] \quad (27)$$

Z rovnice si vyjádříme neznámou **d_i**.

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,x}}{\pi \cdot v}} = [\text{m}] \quad (28)$$

Kde: $\dot{V}_{sk,sp}$ – Objemový průtok za prov. podmínek [m³/s] (24)

v – Zvolená rychlost proudění v potrubí [m/s]

a) Směsný plyn (zemní plyn + dusík)

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,033}{\pi \cdot 15}} = \underline{\underline{0,053}} [\text{m}]$$

Volíme normalizovaný průměr potrubí DN 65 (76,1 x 3,2) PN6 dle ČSN 42 5715.

b) Finální směsný plyn

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,072}{\pi \cdot 15}} = \underline{\underline{0,078}} [\text{m}]$$

Volíme normalizovaný průměr potrubí DN 80 (88,9 x 3,6) PN6 dle ČSN 42 5715.

8.6.1 Skutečná rychlost plynu za směšovací komorou

Jelikož došlo ke změně průměru potrubí, oproti vypočtené hodnotě je potřeba se ujistit, že nedojde k překročení doporučení rychlosti proudění v potrubí. Ve výpočtu budeme vycházet z rovnice (27), přičemž si vyjádříme neznámou v . [1]

$$v_{sk,x} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,x}}{\pi \cdot d_i^2} = [\text{m/s}] \quad (29)$$

Kde: $V_{sk,x}$ – Objemový průtok za prov. podmínek $[\text{m}^3/\text{s}]$ (24)

d_i – Normalizovaný průměr potrubí $[\text{m}]$ (28)

a) Směsný plyn (zemní plyn + dusík)

$$v_{sk,sp} = \frac{4 \cdot 0,033}{\pi \cdot 0,0697^2} = \underline{\underline{8,64}} [\text{m/s}]$$

b) Finální směsný plyn

$$v_{sk,sp,f} = \frac{4 \cdot 0,072}{\pi \cdot 0,0817^2} = \underline{\underline{13,73}} [\text{m/s}]$$

8.7 Průměr potrubí plynů před směšovací komorou

U navrhování průměru před směšovací stanicí provedeme výpočty obdobně jako v **kap. 8.6**, ovšem budeme používat objemové průtoky pro jednotlivé plyny, které jsme získaly v **kap. 8.5**, přičemž zachováme navolenou rychlost **v=15 [m/s]**. [1]

$$d_x = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,x}}{\pi \cdot v}} = [m] \quad (30)$$

Kde: $\dot{V}_{sk,y}$ – Objemový průtok za prov. podmínek [m³/s] (26)

v – Zvolená rychlost proudění v potrubí [m/s]

a) Zemní plyn

$$d_{zp} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,zp}}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,026}{\pi \cdot 15}} = \underline{\underline{0,047}} [m]$$

Volíme normalizovaný průměr potrubí DN 50 (60,3 x 2,9) PN6 dle ČSN 42 5715.

b) PP plyn

$$d_{pp} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,pp}}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,011}{\pi \cdot 15}} = \underline{\underline{0,03}} [m]$$

Volíme normalizovaný průměr potrubí DN 32 (42,4 x 2,6) PN6 dle ČSN 42 5715.

c) PVC plyn

$$d_{pvc} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,pvc}}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,026}{\pi \cdot 15}} = \underline{\underline{0,047}} [m]$$

Volíme normalizovaný průměr potrubí DN 50 (60,3 x 2,9) PN6 dle ČSN 42 5715.

d) Dusík

$$d_{N_2} = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,N_2}}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,007}{\pi \cdot 15}} = \underline{\underline{0,024}} [m]$$

Volíme normalizovaný průměr potrubí DN 25 (33,7 x 2,6) PN6 dle ČSN 42 5715.

8.7.1 Skutečné rychlosti plynů před směšovací komorou

Jelikož došlo ke změně průměru potrubí, oproti vypočtené hodnotě je potřeba se ujistit, že nedojde k překročení doporučení rychlosti proudění v potrubí. Ve výpočtu budeme vycházet z rovnice (29), přičemž si vyjádříme neznámou v . [1]

$$v_{sk,x} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,x}}{\pi \cdot d_x^2} = [m/s] \quad (31)$$

Kde: $V_{sk,x}$ – Objemový průtok za prov. podmínek $[m^3/s]$ (26)

d_x – Normalizovaný průměr potrubí $[m]$ (30)

a) Zemní plyn

$$v_{sk,zp} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,zp}}{\pi \cdot d_{zp}^2} = \frac{4 \cdot 0,026}{\pi \cdot 0,0545^2} = \underline{\underline{11,14}} [m/s]$$

b) PP plyn

$$v_{sk,pp} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,pp}}{\pi \cdot d_{pp}^2} = \frac{4 \cdot 0,011}{\pi \cdot 0,0372^2} = \underline{\underline{10,12}} [m/s]$$

c) PVC plyn

$$v_{sk,pvc} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,pvc}}{\pi \cdot d_{pvc}^2} = \frac{4 \cdot 0,025}{\pi \cdot 0,0545^2} = \underline{\underline{10,71}} [m/s]$$

d) Dusík

$$v_{sk,N_2} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{sk,N_2}}{\pi \cdot d_{N_2}^2} = \frac{4 \cdot 0,007}{\pi \cdot 0,0285^2} = \underline{\underline{10,97}} [m/s]$$

8.8 Shrnutí vypočtených hodnot

V (tab.č. 8.2) jsou shrnuty vypočtené hodnoty jednotlivých průměrů.

Tabulka č. 8.2 Hodnoty rychlostí a průměrů jednotlivých plynů

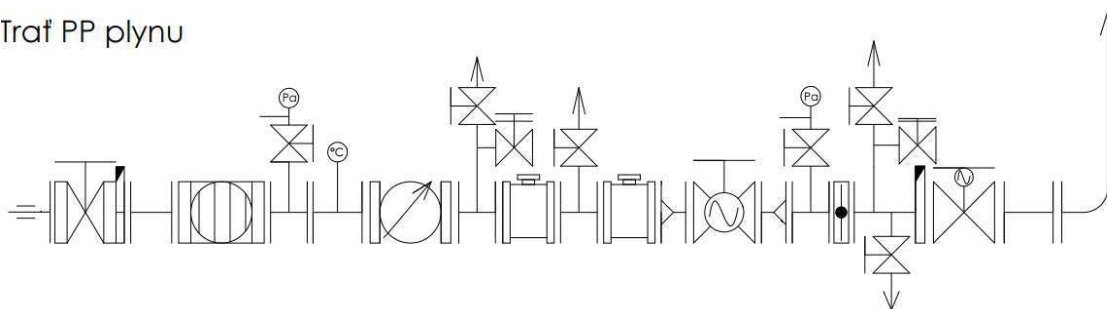
Veličina	Jednotka	Zemní plyn	PP plyn	PVC plyn	Dusík	F. směr. plyn	Směsný plyn
Průměr	[mm]	50	32	50	25	80	65
Rychlost	[m/s]	11,14	10,12	10,71	10,97	13,73	8,64

8.9 Návrh rozvodů plynu ve směšovací stanici

Do kontejneru směšovací stanice vstupují samostatně čtyři venkovní přípojky DN50 zemního plynu, dusíku, PP plynu a PVC plynu. Vně kontejneru jsou průměry potrubních rozvodů pro jednotlivé plyny dle (**tab.č. 8.2**). Vstupy potrubí do směšovacího stanice je realizovány za pomoci zatěsněných chrániček DN100, které slouží jako uložení. Jednotlivé vstupní potrubí jsou osazeny ručními uzavíracími kohouty a zaslepovacími brýlemi pro plynotěsné uzavření přívodu plynů. Za uzavíracími armaturami jsou plynové filtry, které zachycují nečistoty větší jak 5 mikrónů. Filtry jsou osazeny tlakoměry s uzavíracími kulovými kohouty s možností napojení snímače diferenčního tlaku. Za filtrem je zařazena měřicí trať, která obsahuje teploměr a plynoměr, po které následuje odvzdušňovací potrubí osazené kulovými závitovými kohouty a vzorkovacími kulovými kohouty. Následně jsou do tratí řazeny dvojice solenoidových ventilů s odvzdušňovacími ventily, po kterých následuje redukce dimenzí na DN25 kromě dusíkové tratě. Redukce včetně dusíkové tratě jsou osazeny regulačními ventily s elektropohonem. Potrubí dále mění svou dimenzi na původní dimenzi a jsou v nich umístěny zpětné přírubové klapky. Před klapkami jsou v potrubí osazeny tlakoměry s uzavíracími kulovými kohouty s možností napojení snímačů tlaku. Následují odvzdušňovací potrubí se závitovými kulovými kohouty a vzorkovacími kulovými kohouty. Dále jsou větve osazeny odvodňovacími kulovými kohouty. Potrubní tratě dále pokračují přes zaslepovací brýle a uzavírací kulové kohouty s elektropohonem pro plynotěsné uzavření potrubí do směšovacích komor. Směšovací komora (zemní plyn + dusík) je zakončena přírubovým spojením, na který navazuje potrubí DN65 PN6, které je osazeno tlakoměrem s uzavíracím kulovým kohoutem s možností napojení snímače tlaku. Potrubí DN65 PN6 je napojeno na směšovací komoru finálního plynu za pomoci přírubového spoje. Za směšovací komorou finálního směsného plynu je v potrubí DN80 osazen tlakoměr s uzavíracím kulovým kohoutem s možností napojení snímače tlaku a návarek pro měření teploty. Vývod ze směšovací stanice je řešen obdobně přes zatěsněnou chráničku DN100, kde je potrubí zakončeno přírubou. Odvzdušňovací potrubí DN20 jsou vyvedena přes

zatěsněnou chráničku DN50 nad směšovací stanicí. Směšovací stanice se větrá za pomoci 2 ks větracích mřížek, které jsou umístěny v horních částech kontejneru. Na protější straně stanice je ventilátor, který zajišťuje výměnu vzduchu ve stanici. Směšovací stanice je ovládána z centrálního energetického velínu nebo za pomoci ovládacího panelu umístěného vně směšovací stanice. Na **(obr.č.5)** je znázorněna trať PP plynu do směšovací komory a v **příloze č.5** je kompletní schéma směšovací stanice. [12]

Trať PP plynu



Obrázek č.5 Schéma trati PP plynu ve směšovací stanici

9. Určení fyzikálních vlastností směsného plynu

9.1 Chemické složení směsného plynu

Pro určení především spalovacích a fyzikálních vlastností finálního směsného plynu je potřeba znát jeho chemické složení, přičemž se objemové podíly jednotlivých sloučenin ve směsném plynu vypočtou jako součet součinů objemových podílů jednotlivých plynů ve směsném plynu a objemových podílů sloučenin v jednotlivých plynech.

Pro příklad vypočteme objemový podíl metanu v 1 [m³] směsného plynu. Tato chemická sloučenina je obsažena v zemním plynu tak i v pyrolýzních plynech, tudíž její objemový podíl ve směsném plynu bude roven součinu objemového podílu zemního plynu ve směsném plynu a objemového podílu metanu ve směsném plynu, dále součinu objemového podílu pyrolýzního plynu ve směsném plynu a objemového podílu metanu v pyrolýzním plynu, dále součinu objemového podílu PVC ve směsném plynu a objemového podílu metanu v PVC plynu. Matematicky tento vztah vyjádříme pomocí rovnice. [1]

$$\omega_{sp,CH_4} = (\omega_{sp,zp} \cdot \omega_{zp,CH_4} + \omega_{sp,pp} \cdot \omega_{pp,CH_4} + \omega_{sp,pvc} \cdot \omega_{pvc,CH_4}) = \left[m_{CH_4}^3 / m_{sp}^3 \right] \quad (32)$$

Kde: $\omega_{sp,x}$ – Objemové podíly plynů ve směs. plyn. [m³/m³] (tab.č. 6.2)

ω_{x,CH_4} – Objemový podíl metanu v plynech [m³/m³](tab.č. 5.2)

$$\omega_{sp,CH_4} = (0,4 \cdot 0,984 + 0,135 \cdot 0,137 + 0,365 \cdot 0,244) = \underline{\underline{0,5}} \left[m_{CH_4}^3 / m_{sp}^3 \right]$$

Tento postup se aplikuje na ostatní sloučeniny obsažené ve směsném plynu a jejich hodnoty jsou uvedeny v (tab.č. 9.1).

Tabulka č. 9.1 Chemické složení finálního směsného plynu

Složka	Objem. podíl	Složka	Objem. podíl
	[m ³ _x /m ³ _{sp}]		[m ³ _x /m ³ _{sp}]
CO	0,0000	CO ₂	0,0004
H ₂	0,2040	H ₂ O	0,0000
CH ₄	0,5010	N ₂	0,1030
C ₂ H ₄	0,0410	O ₂	0,0000
C ₂ H ₆	0,0370	C ₄ H ₈	0,0300
C ₃ H ₆	0,0670	C ₅ H ₁₀	0,0020
C ₃ H ₈	0,0080	C ₆ H ₁₂	0,0001
C ₄ H ₁₀	0,0045	C ₅ H ₈	0,0020
C ₅ H ₁₂	0	SUMA	1,000

Stejný postup výpočtů se aplikuje i na směsný plyn, který vznikl směřováním zemního plynu s dusíkem a v (**tab.č. 9.2**) jsou uvedeny výsledné chemické složení tohoto plynu.

Tabulka č. 9.2 Chemické složení směsného plynu

Složka	Objem. podíl	Složka	Objem. podíl
CO	0,000	CO ₂	0,001
H ₂	0,000	H ₂ O	0,000
CH ₄	0,787	N ₂	0,206
C ₂ H ₄	0,000	O ₂	0,000
C ₂ H ₆	0,003	C ₄ H ₈	0,000
C ₃ H ₆	0,000	C ₅ H ₁₀	0,000
C ₃ H ₈	0,002	C ₆ H ₁₂	0,000
C ₄ H ₁₀	0,001	C ₅ H ₈	0,000
C ₅ H ₁₂	0,000	SUMA	1,000

9.2 Výpočet hustoty směsného plynu

Při výpočtu hustoty budeme vycházet z rovnice (2) s tím rozdílem, že objemové podíly jednotlivých složek plynů nahradíme objemovými složkami směsného plynu a hustoty jednotlivých složek plynů nahradíme hustotami plynů. Hustotu směsného plynu tedy určíme jako součet součinu objemových podílů směsného plynu a hustotu jednotlivých plynů. [1]

$$\rho_{sp,x} = \sum_i \omega_{i_x} \cdot \rho_{i_x} = [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (33)$$

Kde: ω_{i_x} – Objemové podíly směsného plynu $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ (tab.č. 6.2)

ρ_{i_x} – Hustota jednotlivých plynů $[\text{kg}/\text{m}^3]$ (tab.č. 5.3)

a) Směsný plyn (zemní plyn + dusík)

$$\rho_{sp} = \omega_{zp} \cdot \rho_{zp} + \omega_{N_2} \cdot \rho_{N_2} = 0,8 \cdot 0,728 + 0,2 \cdot 1,25 = \underline{\underline{0,832}} [\text{kg} / \text{m}^3]$$

b) Finální zemní plyn

$$\begin{aligned} \rho_{sp,f} &= \omega_{zp} \cdot \rho_{zp} + \omega_{N_2} \cdot \rho_{N_2} + \omega_{pp} \cdot \rho_{pp} + \omega_{pvc} \cdot \rho_{pvc} = \\ \rho_{sp,f} &= 0,4 \cdot 0,728 + 0,1 \cdot 1,25 + 0,135 \cdot 1,571 + 0,365 \cdot 0,6 = \underline{\underline{0,85}} [\text{kg} / \text{m}^3] \end{aligned}$$

9.3 Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu

V následujících výpočtech budeme již počítat pouze s vlastnostmi finálního směsného plynu, jelikož směsný plyn složený se zemního plynu a dusíku je čistě technologická záležitost směšovací stanice, která se nebude nikde jinde využívat.

Pro dokonalé spálení směsného plynu je potřeba přivést do hořáků určité množství vzduchu, tohle množství vzduchu se určí na základě znalosti chemického složení směsného plynu (**tab.č. 9.1**) a spalovacích rovnic.

Před samotným výpočtem množství spalovacího vzduchu si musíme určit stechiometrické množství kyslíku potřebného pro spálení 1 $[\text{m}^3]$ směsného plynu. Stechiometrické množství kyslíku určíme dle vztahu. [1]

$$V_{O_{2,t}} = 0,5 \cdot \omega_{CO} + 0,5 \cdot \omega_{H_2} + \left(x + \frac{y}{4} \right) \cdot \omega_{C_xH_y} + 3,8 \cdot \omega_{C_MH_N} - \omega_{O_2} = [\text{m}^3 / \text{m}^3] \quad (34)$$

Kde: ω_x – Objemový podíl složek ve směs. plynu $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ (tab.č. 9.1)

$$V_{O_2,t} = 0,5 \cdot 0,204 + \left(1 + \frac{4}{4}\right) \cdot 0,501 + \left(2 + \frac{6}{4}\right) \cdot 0,037 + \left(3 + \frac{8}{4}\right) \cdot 0,008 + \left(4 + \frac{10}{4}\right) \cdot 0,0045 + \\ + \left(4 + \frac{8}{4}\right) \cdot 0,03 + \left(5 + \frac{10}{4}\right) \cdot 0,002 + 3,8 \cdot 0,11 = \underline{\underline{1,915}} \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \right]$$

Následně si vypočteme teoretické množství vzduchu.

$$V_{vz,t} = \frac{1}{0,21} \cdot V_{O_2,t} = \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \right] \quad (35)$$

Kde: $V_{O_2,t}$ – Teoretické množství kyslíku $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ (34)

$$V_{vz,t} = \frac{1}{0,21} \cdot 1,915 = \underline{\underline{9,12}} \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \right]$$

Pro skutečné množství vzduchu je potřeba si zvolit přebytek vzduchu n , díky kterému získáme vztah pro skutečné množství spalovacího vzduchu.

Volíme přebytek vzduchu $n = 1,2$ [-].

$$V_{vz,sk} = V_{vz,t} \cdot n = \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \right] \quad (36)$$

Kde: $V_{vz,t}$ – Teoretické množství vzduchu $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ (35)

n – Přebytek vzduchu [-]

$$V_{vz,sk} = 9,12 \cdot 1,2 = \underline{\underline{10,94}} \left[\text{m}^3 / \text{m}^3 \right]$$

9.4 Určení spalín vzniklých spálením směsného plynu

Z přechozích výpočtů je možné určit množství a složení spalín, které vzniknou spálením 1 $[\text{m}^3]$ směsného plynu. Při výpočtu budeme vycházet ze znalosti složení spalovaného plynu a přebytku vzduchu. Množství spalín, které vzniknou spálením 1 $[\text{m}^3]$ se dá vyjádřit jako součet nespalitelných složek obsažených ve směsném plynu a těch

které vzniknou právě spálením směsného plynu. Matematicky se tento vztah vyjádří pomocí vztahu. [1]

$$V_{\text{spa,sk}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} = [\text{m}^3] \quad (37)$$

Kde si jednotlivé složky vypočteme v následujících kapitolách.

9.4.1 Výpočet oxidu uhličitého

$$V_{\text{CO}_2} = \omega_{\text{CO}} + \omega_{\text{CO}_2} + x \cdot \omega_{\text{C}_x\text{H}_y} + 2,6 \cdot \omega_{\text{C}_m\text{H}_n} = [\text{m}^3] \quad (38)$$

Kde: ω_{i_x} – Objemové podíly směsného plynu $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ (tab.č. 9.1)

$$V_{\text{CO}_2} = 0,0004 + 0,501 + 2 \cdot 0,037 + 3 \cdot 0,008 + 4 \cdot 0,0045 + 4 \cdot 0,03 + 5 \cdot 0,002 + 2,6 \cdot 0,11$$

$$V_{\text{CO}_2} = \underline{\underline{1,03}} [\text{m}^3]$$

9.4.2 Výpočet dusíku

$$V_{\text{N}_2} = \omega_{\text{N}_2} + 0,79 \cdot V_{\text{vz,sk}} = [\text{m}^3] \quad (39)$$

Kde: ω_{i_x} – Objemové podíly směsného plynu $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ (tab.č. 9.1)

$$V_{\text{vz,sk}} - \text{Skutečné množství vzduchu} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3] (36)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,103 + 0,79 \cdot 10,94 = \underline{\underline{8,74}} [\text{m}^3]$$

9.4.3 Výpočet vodní páry

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \omega_{\text{H}_2} + \frac{y}{2} \cdot \omega_{\text{C}_x\text{H}_y} + 2,4 \cdot \omega_{\text{C}_m\text{H}_n} = [\text{m}^3] \quad (40)$$

Kde: ω_{i_x} – Objemové podíly směsného plynu $[\text{m}^3/\text{m}^3]$ (tab.č. 9.1)

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,204 + \frac{4}{2} \cdot 0,501 + \frac{6}{2} \cdot 0,037 + \frac{8}{2} \cdot 0,008 + \frac{10}{2} \cdot 0,0045 + \frac{8}{2} \cdot 0,03 + \\ + \frac{10}{2} \cdot 0,002 + 2,4 \cdot 0,11 = \underline{\underline{1,76}} [\text{m}^3]$$

9.4.4 Výpočet kyslíku

$$V_{\text{O}_2} = V_{\text{O}_2,t} \cdot (n-1) = [\text{m}^3] \quad (41)$$

Kde: $V_{\text{O}_2,t}$ – Teoretické množství kyslíku $[\text{m}^3/\text{m}^3] (34)$

$$V_{O_2} = 1,915 \cdot (1,2 - 1) = \underline{\underline{0,383}} [m^3]$$

Vypočtené hodnoty dosadíme do rovnice (37) a získáme hodnotu celkového množství spalín vzniklých spálením směsného plynu.

$$V_{spa,sk} = 1,03 + 8,74 + 1,76 + 0,383 = \underline{\underline{11,913}} [m^3]$$

9.5 Stanovení mezí zápalnosti (výbušnosti)

Aby došlo ke vznícení směsi potažmo k jejímu trvalému hoření je potřeba si definovat správný poměr mezi spalovacím vzduchem a směsí plynů, tak aby teplo uvolněné hořením dokázalo ohřát určitou směs plynů a spalovacího vzduchu nad zápalnou teplotu. Proto se určuje tzv. dolní (spodní) mez zápalnosti (K_d), která nám definuje nejnižší koncentraci topných plynů ve směsi palivo-vzduch, při které dojde k hoření, nebo naopak horní mez zápalnosti (K_h), která nám definuje nejvyšší koncentraci topného plynu ve směsi palivo-vzduch, při které dojde k hoření. Každá jednotlivá složka plynu má svoji spodní a horní mez zápalnosti a tyto hodnoty jsou uvedeny v (tab.č. 9.3).

Meze výbušnosti se posuzují především kvůli nebezpečí výbuchu topného plynu. Toto nebezpečí výbuchu hrozí především v situacích, když se koncentrace směsi plynu a vzduchu nachází v rozmezí dolní a horní meze výbušnosti a dojde k vnější iniciaci (např. jiskra, horký povrch materiálu). V uzavřeném prostoru je tlaková vlna vzniklá tímto výbuchem mnohem destruktivnější než v otevřeném prostoru. Meze výbušnosti a meze zápalnosti jsou totožné. [1]

Tabulka č. 9.3 Horní a spodní meze zápalnost jednotlivých složek [16]

Složka	Horní mez zápalnosti	Dolní mez zápalnosti	Složka	Horní mez zápalnosti	Dolní mez zápalnosti
	[%]	[%]		[%]	[%]
CO	75,0	12,0	CO ₂	0,0	0,0
H ₂	75,0	4,0	H ₂ O	0,0	0,0
CH ₄	15,0	5,0	N ₂	0,0	0,0
C ₂ H ₄	28,6	2,8	O ₂	0,0	0,0
C ₂ H ₆	13,0	2,9	C ₄ H ₈	9,3	1,6
C ₃ H ₆	11,1	2,0	C ₅ H ₁₀	8,7	1,4
C ₃ H ₈	9,5	2,1	C ₆ H ₁₂	8,4	1,3
C ₄ H ₁₀	8,5	1,9	C ₅ H ₈	8,9	2,0
C ₅ H ₁₂	7,8	1,5			

9.5.1 Dolní mez zápalnosti

Nejprve se určí jednotlivé objemové podíly hořlavých složek v čisté hořlavině. Budeme vycházet z obecné rovnice. Výpočet si provedeme pro složku methanu (CH₄) a ostatní podíly uvedeme v (**tab.č. 9.4**)

$$\omega_{x-\check{c}} = \frac{\omega_{x-h}}{\sum_{x=1} \omega_{x-h}} = [-] \quad (42)$$

Kde: ω_{x-h} – Objemové podíly hořlavých složek [m³/m³] (tab.č.14)

$$\omega_{CH_4-\check{c}} = \frac{\omega_{CH_4-h}}{\omega_{H_2-h} + \sum C_x H_y + \sum C_n H_m} = \frac{0,501}{0,897} = \underline{\underline{0,585}} [-]$$

Tabulka č. 9.4 Objemové podíly hořlavých složek v čisté hořlavině

Složka	Podíl ve směsi	Složka	Podíl ve směsi
	[-]		[-]
H ₂	0,227	C ₄ H ₈	0,033
CH ₄	0,559	C ₄ H ₁₀	0,005
C ₂ H ₄	0,046	C ₅ H ₈	0,002
C ₂ H ₆	0,041	C ₅ H ₂₀	0,002
C ₃ H ₆	0,075	C ₅ H ₁₂	0,000
C ₃ H ₈	0,009	C ₆ H ₁₂	0,000

Následně se určí spodní mez zápalnosti z čistých hořlavých složek podle rovnice.
Ve které budeme jednotlivé

$$K_{d-\check{c}} = \frac{100}{\sum_{x=1} \frac{\omega_{x-h}}{K_{dx-h}}} = [\%] \quad (43)$$

Dále se provede korekce meze zápalnosti na balast (nehořlavé složky).

$$B = (\omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}) \cdot 100 = [\%] \quad (44)$$

Z toho plyne, že korigovaná spodní mez zápalnosti na balast bude

$$K_d = \frac{\left(1 + \frac{\omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}}{100 - \omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}}\right) \cdot 100}{100 + \frac{100}{\sum_{x=1} \frac{\omega_{x-h}}{K_{dx-d}}} \cdot \frac{\omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}}{100 - \omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}}} \cdot \frac{100}{\sum_{x=1} \frac{\omega_{x-h}}{K_{dx-d}}} = [\%] \quad (45)$$

Kde: ω_{x-h} – Objemové podíly hořlavých složek [-] (tab.č.17)

K_{dx-d} – Dolní mez zápalnosti [-] (tab.č.16)

ω_x – Objem podíl nehořlavých složek [-] (tab.č.14)

$$K_d = \frac{\left(1 + \frac{10,3}{100 - 10,3}\right) \cdot 100}{100 + \frac{100}{22,476} \cdot \frac{10,3}{100 - 10,3}} \cdot \frac{100}{22,476} = \underline{\underline{4,93}} [\%]$$

9.5.2 Horní mez zápalnosti

Horní mez zápalnosti se bude počítat obdobně jako spodní mez zápalnosti, přičemž budeme vycházet z (tab.č. 9.4) kde jsou určeny jednotlivé podíly hořlavých složek v čisté hořlavině a následně si určíme horní mez zápalnosti z čistých hořlavých složek dle následující rovnice. [1]

$$K_{h-\check{c}} = \frac{100}{\sum_{x=1} \frac{\omega_{x-h}}{K_{hx-h}}} = [\%] \quad (46)$$

U výpočtu korigované horní mezní zápalnosti na balast budeme vycházet z rovnice (45), ovšem s tou výjimkou že do ní vložíme rovnici (46).

$$K_h = \frac{\left(1 + \frac{\omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}}{100 - \omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}}\right) \cdot 100}{100 + \frac{1}{\sum_{x=1} \frac{\omega_{x-h}}{K_{hx-h}}} \cdot \frac{\omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}}{100 - \omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}}} \cdot \frac{100}{\sum_{x=1} \frac{\omega_{x-h}}{K_{hx-h}}} = [\%] \quad (47)$$

Kde: ω_{x-h} – Objemové podíly hořlavých složek [-] (tab.č. 9.4)

K_{dx-h} – Horní mez zápalnosti [-] (tab.č. 9.3)

ω_x – Objem podíl nehořlavých složek [-] (tab.č. 9.1)

$$K_h = \frac{\left(1 + \frac{10,3}{100 - 10,3}\right) \cdot 100}{100 + \frac{1}{5,64} \cdot \frac{10,3}{100 - 10,3}} \cdot \frac{100}{5,64} = \underline{\underline{19,7}} [\%]$$

9.6 Vlastnosti směsného plynu

V (tab.č. 9.5) jsou shrnuty vlastnosti směsného plynu.

Tabulka č. 9.5 Vlastnosti směsného plynu

Veličina	Značení	Jednotka	Směsný plyn
Hustota	$\rho_{sp,f}$	[kg/m ³]	0,85
Spotřeba vzduchu	$V_{vz,sk}$	[m ³ /m ³]	10,94
Spaliny vzniklé spálením 1 [m ³] směsného plynu.			
Množství CO ₂	V_{CO2}	[m ³]	1,03
Množství H ₂ O	V_{H2O}	[m ³]	1,76
Množství O ₂	V_{O2}	[m ³]	0,383
Dolní mez zápal.	K_d	[%]	4,93
Horní mez zápal.	K_h	[%]	19,7

10 Tlakové ztráty v potrubí směšovací stanice

Tlakové ztráty, které vznikají třením plynu o povrch trubky odebírají plynu kinetickou energii, a aby byl plyn schopný projít potrubním systémem o určité rychlosti nahrazuje tuto ztrátu poklesem celkového tlaku na konci potrubního systému. Proto je důležité po návržení průměru potrubí vypočítat tuto tlakovou ztrátu. Tlakové ztráty je možné rozdělit na tlakové ztráty v rovném potrubí a na ztráty místními odpory, kdy součet těchto ztrát nám vyjádří celkovou ztrátu v potrubním systému. [1]

10.1 Reynoldsova čísla

Pro určení součinitele tření λ [-] a následný výpočet celkových tlakových ztrát je potřeba si určit druh proudění v potrubí. Druh proudění v potrubí se určuje na základě Reynoldsova čísla. Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina, která nám popisuje charakter proudící kapaliny v potrubí a je obecně závislá na hustotě a viskozitě proudícího plynu, rychlosti proudění, charakteristickém rozměru. [1]

10.1.1 Výpočet hustot plynů v provozních stavech

Pro určení velikosti Reynoldsova čísla musíme znát hustotu plynů v jejich skutečných parametrech. K výpočtu použijeme opět stavovou rovnici.

$$\frac{p_x \cdot V_x}{T_x} = \frac{p_n \cdot V_n}{T_n} \Rightarrow \frac{T_x}{p_x \cdot V_x} = \frac{T_n}{p_n \cdot V_n} \quad (48)$$

Rovnici vynásobíme hmotností, kdy $m = \text{konst.}$

$$\frac{T_x \cdot m}{p_x \cdot V_x} = \frac{T_n \cdot m}{p_n \cdot V_n} \Rightarrow \frac{T_x \cdot \rho_x}{p_x} = \frac{T_n \cdot \rho_n}{p_n} \quad (49)$$

Rovnici upravíme.

$$\rho_x = \rho_n \cdot \frac{T_n \cdot p_x}{T_x \cdot p_n} \quad (50)$$

Kde: ρ_n – Hustota za normálních podmínek $[\text{kg/m}^3](\text{tab.č. 5.3}), (33)$

p_n – Tlak za normálních podmínek $[\text{Pa}]$

p_x – Absolutní tlak v potrubí $[\text{Pa}](\text{tab.č. 7.1})$

T_x – Skutečná teplota v potrubí $[\text{°C}](\text{tab.č. 7.1})$

T_n – Teplota za normálních podmínek [°C]

a) Zemní plyn

$$\rho_{zp} = \rho_n \cdot \frac{T_n \cdot p_{zp}}{T_{zp} \cdot p_n} = 0,73 \cdot \frac{273,15 \cdot (101325 + 70000)}{(273,15 + 20) \cdot 101325} = \underline{\underline{1,15}} [\text{kg} / \text{m}^3]$$

b) PP plyn

$$\rho_{pp} = \rho_n \cdot \frac{T_n \cdot p_{pp}}{T_{pp} \cdot p_n} = 1,57 \cdot \frac{273,15 \cdot (101325 + 60000)}{(273,15 + 50) \cdot 101325} = \underline{\underline{1,98}} [\text{kg} / \text{m}^3]$$

c) PVC plyn

$$\rho_{pvc} = \rho_n \cdot \frac{T_n \cdot p_{pvc}}{T_{pvc} \cdot p_n} = 0,6 \cdot \frac{273,15 \cdot (101325 + 70000)}{(273,15 + 50) \cdot 101325} = \underline{\underline{0,75}} [\text{kg} / \text{m}^3]$$

d) Dusík

$$\rho_{N_2} = \rho_n \cdot \frac{T_n \cdot p_{N_2}}{T_{N_2} \cdot p_n} = 1,25 \cdot \frac{273,15 \cdot (101325 + 65000)}{(273,15 + 20) \cdot 101325} = \underline{\underline{1,96}} [\text{kg} / \text{m}^3]$$

e) Směsný plyn (zemní plyn + dusík)

$$\rho_{sp} = \rho_n \cdot \frac{T_n \cdot p_{N_2}}{T_{N_2} \cdot p_n} = 0,832 \cdot \frac{273,15 \cdot (101325 + 60000)}{(273,15 + 20) \cdot 101325} = \underline{\underline{1,23}} [\text{kg} / \text{m}^3]$$

f) Finální směsný plyn

$$\rho_{sp,f} = \rho_n \cdot \frac{T_n \cdot p_{sp}}{T_{sp} \cdot p_n} = 0,85 \cdot \frac{273,15 \cdot (101325 + 50000)}{(273,15 + 30) \cdot 101325} = \underline{\underline{1,14}} [\text{kg} / \text{m}^3]$$

10.1.2 Výpočet dynamických viskozit jednotlivých plynů

Další veličinou, kterou potřebujeme vypočítat pro výpočet Reynoldsova čísla je dynamická viskozita jednotlivých plynů. Při výpočtu dynamické viskozity budeme vycházet ze vztahů Herninga a Zipperera, Wilkeho a Grahama, přičemž budeme vycházet

z hodnot z (tab.č. 5.1). Pro příklad si vypočteme dynamickou viskozitu zemního plynu. V (tab.č. 10.1) jsou uvedeny veličiny, které využijeme pro výpočet. [15]

Tabulka č. 10.1 Složení a vlastnosti zemního plynu

Zemní plyn			
Složky	Zastoupení	Dyn. visk.	Molar. hmot.
	[%]	[Pa.s.10 ⁻⁵]	[kg/kmol]
CO	0	1,65	28,01
H ₂	0	0,84	2,02
CH ₄	98,4	1,02	16,04
C ₂ H ₄	0	0,947	28,05
C ₂ H ₆	0,4	0,861	30,07
C ₃ H ₆	0	0,781	42,08
C ₃ H ₈	0,2	0,747	44,1
C ₄ H ₁₀	0,1	0,677	58,12
C ₅ H ₁₂	0	0,871	72,15
CO ₂	0,1	1,37	44,01
H ₂ O	0	0,92	18,02
N ₂	0,8	1,66	28,01
O ₂	0	1,91	32
C ₄ H ₈	0	0,947	56,11
C ₅ H ₁₀	0	0,205	70,13
C ₆ H ₁₂	0	0,469	84,16
C ₅ H ₈	0	25,9	68,12

a) Rovnice podle Wilkeho

$$\eta_{zp,w} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \cdot \eta_i}{\sum_{j=1}^n x_i \cdot \phi_{i,j}} = [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (51)$$

Kde: x_i – Zastoupení složky ve směsi [%](tab.č. 10.1)
 n – Počet chemických složek ve směsi [-](tab.č. 10.1)
 η_i, η_j – Dynamické viskozity složek i, j [Pa.s](tab.č. 5.1)

Složka $\phi_{i,j}$ [-] se spočítá následující rovnicí.

$$\phi_{i,j} = \frac{1}{\sqrt{8}} \cdot \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-0,5} \cdot \left[1 + \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0,25} \right]^2 = [-] \quad (52)$$

Kde: M_i, M_j – Počet chemických složek ve směsi [kg/kmol](tab.č. 5.1)

η_i, η_j – Dynamické viskozity složek i, j [Pa.s](tab.č. 5.1)

Pro zjednodušení výpočtů si jednotlivé mezi výpočty uvedeme v **(tab.č. 10.2)**.

Tabulka č. 10.2 Mezi výpočty pro výpočet dyn. vis. podle Wilkeho

		M_i/M_j	M_j/M_i	η_i/η_j	$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot x_i$			M_i/M_j	M_j/M_i	η_i/η_j	$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot x_i$
1	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,006	4	1	1,00	1,00	1,00	1,00	0,529
	2	0,53	1,87	1,19	1,48			2	3,62	0,28	0,66	0,42	
	3	0,36	2,75	1,37	1,90			3	1,93	0,52	0,79	0,63	
	4	0,28	3,62	1,51	2,28			4	1,32	0,76	0,91	0,83	
	5	0,36	2,74	0,75	1,35			5	1,32	0,76	0,49	0,64	
	6	0,57	1,75	0,62	1,02			6	2,07	0,48	0,41	0,47	
		M_i/M_j	M_j/M_i	η_i/η_j	$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot x_i$			M_i/M_j	M_j/M_i	η_i/η_j	$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot x_i$
2	1	1,00	1,00	1,00	1,00	0,668	5	1	1,00	1,00	1,00	1,00	0,608
	2	1,87	0,53	0,84	0,66			2	2,74	0,36	1,34	0,66	
	3	0,68	1,47	1,15	1,30			3	1,46	0,68	1,59	1,04	
	4	0,52	1,93	1,27	1,56			4	1,00	1,00	1,84	1,39	
	5	0,68	1,46	0,63	0,95			5	0,76	1,32	2,03	1,70	
	6	1,07	0,93	0,52	0,72			6	1,57	0,64	0,82	0,72	
		M_i/M_j	M_j/M_i	η_i/η_j	$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot x_i$			M_i/M_j	M_j/M_i	η_i/η_j	$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot x_i$
3	1	1,00	1,00	1,00	1,00	0,508	6	1	1,00	1,00	1,00	1,00	0,762
	2	2,75	0,36	0,73	0,51			2	0,88	0,57	1,62	1,15	
	3	1,47	0,68	0,87	0,77			3	0,50	1,07	1,93	1,68	
	4	0,76	1,32	1,10	1,20			4	0,40	1,57	2,23	2,13	
	5	1,00	1,00	0,54	0,75			5	0,33	2,07	2,46	2,54	
	6	1,57	0,64	0,45	0,56			6	0,41	1,57	1,21	1,48	

$$\eta_{zp,W} = \frac{x_{CH_4} \cdot \eta_{CH_4}}{\sum \phi_{1,i,j} \cdot x_{CH_4}} + \frac{x_{C_2H_6} \cdot \eta_{C_2H_6}}{\sum \phi_{2,i,j} \cdot x_{C_2H_6}} + \frac{x_{C_3H_8} \cdot \eta_{C_3H_8}}{\sum \phi_{3,i,j} \cdot x_{C_3H_8}} + \frac{x_{C_4H_{10}} \cdot \eta_{C_4H_{10}}}{\sum \phi_{4,i,j} \cdot x_{C_4H_{10}}} + \frac{x_{CO_2} \cdot \eta_{CO_2}}{\sum \phi_{5,i,j} \cdot x_{CO_2}} + \frac{x_{N_2} \cdot \eta_{N_2}}{\sum \phi_{6,i,j} \cdot x_{N_2}} =$$

$$= \frac{0,984 \cdot 1,02 \cdot 10^{-5}}{1,006} + \frac{0,004 \cdot 0,861 \cdot 10^{-5}}{0,668} + \frac{0,002 \cdot 0,747 \cdot 10^{-5}}{0,508} + \frac{0,001 \cdot 0,677 \cdot 10^{-5}}{0,529} +$$

$$+ \frac{0,001 \cdot 1,37 \cdot 10^{-5}}{0,608} + \frac{0,008 \cdot 1,66 \cdot 10^{-5}}{0,762} = \underline{\underline{1,03}} [\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}]$$

b) Rovnice podle Grahama

$$\eta_{zp,G} = \sum_{i=1}^n \eta_i \cdot \frac{x_i}{100} = [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (53)$$

Kde: x_i – Zastoupení složky ve směsi [%](tab.č. 10.1)

n – Počet chemických složek ve směsi [-](tab.č. 10.1)

η_i – Dynamické viskozity složek [Pa.s] (tab.č. 5.1)

$$\eta_{zp,G} = \eta_{CH_4} \cdot \frac{x_{CH_4}}{100} + \eta_{C_2H_6} \cdot \frac{x_{C_2H_6}}{100} + \eta_{C_3H_8} \cdot \frac{x_{C_3H_8}}{100} + \eta_{C_4H_{10},G} \cdot \frac{x_{C_4H_{10}}}{100} + \eta_{CO_2} \cdot \frac{x_{CO_2}}{100} + \eta_{N_2} \cdot \frac{x_{N_2}}{100} =$$

$$1,02 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{98,4}{100} + 0,861 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,4}{100} + 0,747 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,2}{100} + 0,677 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,1}{100} + 1,37 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,1}{100} +$$

$$+ 1,66 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,8}{100} = \underline{\underline{1,03}} [\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}]$$

c) Rovnice podle Herninga a Zipperera

$$\eta_{x,HZ} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i \cdot \eta_i}{\sum_{j=1}^n x_i \cdot \phi_{i,j}} = [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (54)$$

Kde: x_i – Zastoupení složky ve směsi [%](tab.č.19)

n – Počet chemických složek ve směsi [-](tab.č.19)

η_i – Dynamické viskozity složek [Pa.s](tab.č.6)

Složka $\phi_{i,j}$ se spočítá následující rovnicí

$$\phi_{i,j} = \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{0,5} = [-] \quad (55)$$

Kde: M_i, M_j – Molární hmotnosti [kg/kmol](tab.č.6)

Pro zjednodušení výpočtů si jednotlivé mezi výpočty uvedeme v (tab.č. 10.3).

Tabulka č. 10.3 Mezi výpočet pro výpočet dyn. vis. podle Herninga a Zipperera

		$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot X_i$			$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot X_i$			$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot X_i$
1	1	1,00	1,007	3	1	1,00	0,607	5	1	1,00	0,608
	2	1,37			2	0,60			2	0,60	
	3	1,66			3	0,83			3	0,83	
	4	1,90			4	1,15			4	1,00	
	5	1,66			5	1,00			5	1,15	
	6	1,32			6	0,80			6	0,80	
		$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot X_i$			$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot X_i$			$\phi_{i,j}$	$\Sigma\phi_{i,j} \cdot X_i$
2	1	1,00	0,735	4	1	1,00	0,529	6	1	1,00	0,762
	2	0,73			2	0,53			2	0,76	
	3	1,21			3	0,72			3	1,04	
	4	1,39			4	0,87			4	1,25	
	5	1,21			5	0,87			5	1,44	
	6	0,97			6	0,69			6	1,25	

$$\begin{aligned} \eta_{zp,W} &= \frac{x_{CH_4} \cdot \eta_{CH_4}}{\Sigma\phi_{1,i,j} \cdot x_{CH_4}} + \frac{x_{C_2H_6} \cdot \eta_{C_2H_6}}{\Sigma\phi_{2,i,j} \cdot x_{C_2H_6}} + \frac{x_{C_3H_8} \cdot \eta_{C_3H_8}}{\Sigma\phi_{3,i,j} \cdot x_{C_3H_8}} + \frac{x_{C_4H_{10}} \cdot \eta_{C_4H_{10}}}{\Sigma\phi_{4,i,j} \cdot x_{C_4H_{10}}} + \frac{x_{CO_2} \cdot \eta_{CO_2}}{\Sigma\phi_{5,i,j} \cdot x_{CO_2}} + \frac{x_{N_2} \cdot \eta_{N_2}}{\Sigma\phi_{6,i,j} \cdot x_{N_2}} = \\ &= \frac{0,984 \cdot 1,02 \cdot 10^{-5}}{1,007} + \frac{0,004 \cdot 0,861 \cdot 10^{-5}}{0,735} + \frac{0,002 \cdot 0,747 \cdot 10^{-5}}{0,607} + \frac{0,001 \cdot 0,677 \cdot 10^{-5}}{0,529} + \\ &+ \frac{0,001 \cdot 1,37 \cdot 10^{-5}}{0,608} + \frac{0,008 \cdot 1,66 \cdot 10^{-5}}{0,762} = \underline{\underline{1,03}} [Pa \cdot s \cdot 10^{-5}] \end{aligned}$$

Pro získání finální hodnoty dynamické viskozity se spočítá aritmetický průměr jednotlivých dynamických viskozit.

$$\eta_{c,zp} = \frac{\eta_{zp,W} + \eta_{zp,G} + \eta_{zp,HZ}}{3} = [\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}] \quad (56)$$

Kde: $\eta_{zp,x}$ – Dynamické viskozity $[\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}]$

$$\eta_{zp} = \frac{1,03 + 1,03 + 1,03}{3} = \underline{\underline{1,03}} [\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}]$$

Obdobně se spočítají i zbývající dynamické viskozity a jejich hodnoty jsou uvedeny v (**tab.č. 10.4**) včetně dynamické viskozity zemního plynu.

Tabulka č. 10.4 Jednotlivé dynamické viskozity

	Dynamická viskozita			
Druh plynu	η_W	η_G	η_{HZ}	η_c
	Wilke	Graham	Her. a Zippe.	Celková dyn.vis.
	$[\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}]$	$[\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}]$	$[\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}]$	$[\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot 10^{-5}]$
PP plyn	0,96	1,34	1,55	1,28
PVC plyn	1,02	0,984	1,16	1,05
Dusík	1,66	1,66	1,66	1,66
Zemní plyn	1,03	1,03	1,03	1,03
Směsný plyn	1,16	1,15	1,19	1,17
Final sm. plyn	1,12	1,14	1,27	1,18

10.1.3 Výpočet Reynoldsova čísla

Při výpočtech Reynoldsova čísla můžeme narazit na tři druhy proudění, které jsou odvozeny od velikosti Reynoldsova čísla. [1]

a) Laminární proudění – Vzniká při $Re \leq 2320$ a velikost součinitele tření je závislá pouze na Reynoldsově číslu.

b) Nerozvinuté turbulentní proudění – Jedná se o přechodnou oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním, kde je závislost součinitele tření závislá na poměrné drsnosti potrubí a Reynoldsově číslu.

c) Rozvinuté turbulentní proudění – Vzniká při $Re \geq 10^4$ a velikost součinitele tření je závislá na poměrné drsnosti tření.

Vztah pro vyjádření Reynoldsova čísla popisuje následující rovnice.

$$Re_x = \frac{d_x \cdot v_x \cdot \rho_x}{\eta_x} = [-] \quad (57)$$

Kde:	d_x – Průměr potrubí	[m]	(tab.č. 8.2)
	v_x – Rychlost proudění v potrubí	[m/s]	(tab.č. 8.2)
	ρ_x – Hustota proudícího plynu	[kg/m ³]	(50)
	η_x – Dynamická viskozita plynů	[Pa.s]	(tab.č. 10.3)

a) Zemní plyn

$$Re_{zp} = \frac{d_{zp} \cdot v_{zp} \cdot \rho_{zp}}{\mu_{zp}} = \frac{0,0545 \cdot 11,14 \cdot 1,15}{1,03 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{67786}} [-]$$

b) PP plyn

$$Re_{pp} = \frac{d_{pp} \cdot v_{pp} \cdot \rho_{pp}}{\mu_{pp}} = \frac{0,0372 \cdot 10,12 \cdot 1,98}{1,28 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{58234}} [-]$$

c) PVC plyn

$$Re_{pvc} = \frac{d_{pvc} \cdot v_{pvc} \cdot \rho_{pvc}}{\mu_{pvc}} = \frac{0,0545 \cdot 10,71 \cdot 0,75}{1,05 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{41692}} [-]$$

d) Dusík

$$Re_{N_2} = \frac{d_{N_2} \cdot v_{N_2} \cdot \rho_{N_2}}{\mu_{N_2}} = \frac{0,0285 \cdot 10,97 \cdot 1,96}{1,66 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{36914}} [-]$$

e) Směsný plyn (zemní plyn + dusík)

$$Re_{sp} = \frac{d_{sp} \cdot v_{sp} \cdot \rho_{sp}}{\mu_{sp}} = \frac{0,0697 \cdot 8,64 \cdot 1,23}{1,17 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{63309}} [-]$$

f) Finální směsný plyn

$$Re_{sp,f} = \frac{d_{sp,f} \cdot v_{sp,f} \cdot \rho_{sp,f}}{\mu_{sp,f}} = \frac{0,0817 \cdot 13,73 \cdot 1,14}{1,18 \cdot 10^{-5}} = \underline{\underline{108371}} [-]$$

Ve všech případech proudění se dle výpočtů bude jednat o turbulentní proudění, které se odrazí na výpočtech relativní drsnosti potrubí.

10.2 Relativní drsnost potrubí

Pro výpočet celkových tlakových ztrát si musíme určit absolutní drsnost vnitřních stěn potrubí **k [mm]**. Drsnost potrubí pro trubky bezešvé válcové se pohybuje v rozmezí **k= 0,04 – 0,1 [mm]**. Pro výpočty potom budeme počítat s hodnotou **k= 0,08[mm]**. Relativní drsnost potrubí $\epsilon [-]$ se potom určí na základě podílu absolutní drsnosti a vnitřního průměru trubky. Matematicky se tento vztah vyjádří následovně. [1]

$$\epsilon_x = \frac{k}{d_x} = [-] \quad (58)$$

10.1.1 Výpočet součinitele tření

K určení součinitele tření potrubí využijeme vztahy pro rozvinuté turbulentní proudění podle Gončarova vzorce. Kdy do rovnice vložíme rovnici (58).

$$\lambda_x = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{\epsilon}{d_x}} \right) \right]^2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{k}{d_x^2}} \right) \right]^2} [-] \quad (59)$$

Kde: k – Drsnost vnitřní stěn potrubí [mm]

d_x – Vnitřní průměr potrubí [mm] (tab.č. 8.2)

a) Zemní plyn

$$\lambda_{zp} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{k}{d_{zp}^2}} \right) \right]^2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{0,08}{54,5^2}} \right) \right]^2} = \underline{\underline{0,011[-]}}$$

b) PP plyn

$$\lambda_{pp} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{k}{d_{pp}^2}} \right) \right]^2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{0,08}{37,2^2}} \right) \right]^2} = \underline{\underline{0,01[-]}}$$

c) PVC plyn

$$\lambda_{pvc} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{k}{d_{pvc}^2}} \right) \right]^2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{0,08}{54,5^2}} \right) \right]^2} = \underline{\underline{0,011[-]}}$$

d) Dusík

$$\lambda_{N_2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{k}{d_{N_2}^2}} \right) \right]^2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{0,08}{28,5^2}} \right) \right]^2} = \underline{\underline{0,012[-]}}$$

e) Směsný plyn (zemní plyn + dusík)

$$\lambda_{sp} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{k}{d_{sp}^2}} \right) \right]^2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{0,08}{69,7^2}} \right) \right]^2} = \underline{\underline{0,009[-]}}$$

f) Finální směsný plyn

$$\lambda_{sp,f} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{k}{d_{sp,f}^2}} \right) \right]^2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\frac{0,08}{81,7^2}} \right) \right]^2} = \underline{\underline{0,008[-]}}$$

10.3 Tlakové ztráty v rovném potrubí

Při výpočtech tlakových ztrát v rovném potrubí budeme uvažovat, že hustota plynu se nebude měnit po délce potrubí vlivem navyšování tlakových ztrát. Budeme tedy brát proudící plyn jako kapalinu, která má neměnnou hustotu a při výpočtu tlakové ztráty budeme vycházet z rovnice. [1]

$$\Delta p_z = \lambda \cdot \frac{1}{d_x} \cdot \frac{c_x^2}{2} \cdot \rho_x = [\text{Pa}] \quad (60)$$

10.4 Tlakové ztráty místními odpory

Jelikož se potrubní trať ve směšovací stanici neskládá pouze z rovných potrubí je nutno do výpočtu tlakových ztrát zařadit i ztráty, které vznikají v místních odporech. Za místní odpory se považují potrubní prvky, které jsou různě zahnuté, zúžené nebo to jsou prvky různých tvarů. Při určování místních tlakových ztrát budeme vycházet z tzv. ekvivalentní délky potrubí, což je délka potrubí o stejné dimenzi, která má stejnou tlakovou ztrátu jako místní odpor. Matematicky se tato rovnice vyjadřuje následovně. [1]

$$\Delta p_z = \lambda \cdot \frac{l_{ekv}}{d_x} \cdot \frac{c_x^2}{2} \cdot \rho_x = [\text{Pa}] \quad (61)$$

10.5 Výpočet celkových tlakových ztrát

Celková tlaková ztráta je součet ztrát v rovném potrubí a ve ztrátách místních odporů. Matematicky se tento vztah dá vyjádřit sloučením rovnic (60) a (61) ve výsledku potom mít rovnice následující tvar. [1]

Délky jednotlivých tratí jsou uvedeny v přílohách.

Určení ekvivalentních délek pro jednotlivé armatury provedeme za pomoci spojnicových monogramů a katalogových listů. [1]

$$\Delta p_z = \lambda_x \cdot \frac{l_x + \sum l_{ekv}}{d_x} \cdot \frac{v_{sk,x}^2}{2} \cdot \rho_x = [\text{Pa}] \quad (62)$$

Kde:	l – Celková délka potrubí	[m]
	d_x – Vnitřní průměr potrubí	[m] (tab.č. 8.2)
	l_{ekv} – Ekvivalentní délka potrubí	[m]
	λ_x – Součinitel tření	[-] (59)
	$v_{sk,x}$ – Rychlost proudění plynu v potrubí	[m/s] (tab.č. 8.2)
	ρ_x – Hustota jednotlivých plynů	[kg/m ³] (50)

a) Zemní plyn

$$\Delta p_z = \lambda_{zp} \cdot \frac{l_{zp} + \sum l_{ekv}}{d_{zp}} \cdot \frac{v_{sk,zp}^2}{2} \cdot \rho_{zp} = 0,011 \cdot \frac{8,5+14,5}{0,0545} \cdot \frac{11,14^2}{2} \cdot 1,15 = \underline{\underline{331}} [\text{Pa}]$$

b) PP plyn

$$\Delta p_z = \lambda_{pp} \cdot \frac{l_{pp} + \sum l_{ekv}}{d_{pp}} \cdot \frac{v_{sk,pp}^2}{2} \cdot \rho_{pp} = 0,01 \cdot \frac{10+14,5}{0,0372} \cdot \frac{10,12^2}{2} \cdot 1,98 = \underline{\underline{667}} [\text{Pa}]$$

c) PVC plyn

$$\Delta p_z = \lambda_{pvc} \cdot \frac{l_{pvc} + \sum l_{ekv}}{d_{pvc}} \cdot \frac{v_{sk,pvc}^2}{2} \cdot \rho_{pvc} = 0,011 \cdot \frac{8,5+14,5}{0,0545} \cdot \frac{10,71^2}{2} \cdot 0,75 = \underline{\underline{199}} [\text{Pa}]$$

d) Dusík

$$\Delta p_z = \lambda_{N_2} \cdot \frac{l_{N_2} + \sum l_{ekv}}{d_{N_2}} \cdot \frac{v_{sk,N_2}^2}{2} \cdot \rho_{N_2} = 0,012 \cdot \frac{10+13,2}{0,0285} \cdot \frac{10,97^2}{2} \cdot 1,96 = \underline{\underline{1152}} [\text{Pa}]$$

e) Směsný plyn (zemní plyn + dusík)

$$\Delta p_z = \lambda_{sp} \cdot \frac{l_{sp} + \sum l_{ekv}}{d_{sp}} \cdot \frac{v_{sk,sp}^2}{2} \cdot \rho_{sp} = 0,009 \cdot \frac{2+2,8}{0,0697} \cdot \frac{8,64^2}{2} \cdot 1,23 = \underline{\underline{28}} [\text{Pa}]$$

f) Finální směsný plyn

$$\Delta p_z = \lambda_{sp,f} \cdot \frac{l_{sp,f} + \sum l_{ekv}}{d_{sp,f}} \cdot \frac{v_{sk,sp,f}^2}{2} \cdot \rho_{sp,f} = 0,008 \cdot \frac{1,5+1,4}{0,0817} \cdot \frac{13,73^2}{2} \cdot 1,14 = \underline{\underline{30}} [\text{Pa}]$$

10.6 Srovnání vypočtených hodnot

V (tab.č. 10.5) jsou srovnány vypočtené hodnoty celkových tlakových ztrát.

Tabulka č. 10.5 Celkové tlakové ztráty

Druh plynu	Celková tlaková ztráta
	[Pa]
Zemní plyn	331
PP plyn	667
PVC plyn	199
Dusík	1152
Směsný plyn (zemní plyn+ dusík)	28
Finální směsný plyn	30

11. Návrh směšovací komory

Směšovací komora je technologický prvek směšovací stanice, ve kterém se homogenizuje směs plynů vstupujících do směšovací komory. Tyto plyny se dají dělit na plyny nosné a plyny přídavné, přičemž plyny nosné jsou zpravidla ty, které mají větší podíl ve směsi. Z hlediska konstrukce se směšovací komory dělí na: [1]

a) Venturiho směšovač – Využívá se u míšení plynů se stejnými tlaky. Plyn se u tohoto typu směšovače přisává za pomoci ejekčního účinku, který vzniká rozdílem tlaků obou plynů v komoře.

b) Souproudý směšovač – U souproudého směšovače je potřeba aby byl mezi plyny znatelný tlakový rozdíl. Samotná proces míšení probíhá na dlouhé trati, což je nevýhodná u místních směšovacích stanic.

c) Tangenciální směšovač – Obdobně jako u souproudých směšovačů i tangenciální směšovače potřebují vysoký tlakový rozdíl mezi míšenými plyny. Naopak od souproudých směšovačů je tento typ směšovače vhodnější pro míšení plynů na krátkých vzdálenostech.

Pro míšení plynů využijeme tangenciální směšovač, který nám zajistí na krátké trase dostatečné promíšení, a to v případě míšení zemního plynu s dusíkem i následném míšení PP plynu, PVC plynu a směsi zemního plynu s dusíkem.

11.1 Tangenciální směšovací komory

Směšovací komory jsou řešeny jako svařence, které se skládají z přírubových spojů, které nám zajistí jednoduché napojení na potrubí nosného plynu a následující napojení na potrubí směsného plynu. Tělo směšovací komory je vytvořeno zakroužením plechu a jeho velikost je dostačující pro smíšení plynů, jelikož se bere v úvahu, že k sekundárnímu promíšení plynů dojde při dopravě směsného plynu do místa jeho spotřeby. Přídavný plyn je do komory přiváděn třemi potrubími, které tangenciálně ústí do těla směšovací komory a kolem těla směšovací komory je vytvořen prstenec, taktéž svařenec, do kterého je přes přírubový spoj dodáván již zmiňovaný přídavný plyn. Na (obr.č. 6) je uveden 3D model směšovací komory. Jednotlivé průměry vtokových otvorů se určují na základě vtokových rychlostí přídavných plynů a tlakových rozdílů mezi jednotlivými plyny.

Plná verze obrázku je utajená. V případě zájmu je dostupná na Katedře energetiky,
Fakulty strojní, VŠB – TU Ostrava

Obrázek č.6 3D model směšovací komory

Výkresová část včetně kusovníku směšovací komory jsou uvedeny v **přílohách č. 6 a č.7.**

11.1.1 Výpočet rychlosti plynů ve výtokových otvorech trysek

Rychlost přídavných plynů ve výtokových otvorech směšovací komory se stanoví z následující rovnice. Kde se velikost výtokového součinitele pohybuje v rozmezích $\varphi = 0,65 - 0,7$ [-]. Pro výpočty budeme používat hodnotu $\varphi = 0,7$ [-]. [1]

$$v_{x, \text{vtok}} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_x}{\rho_x}} = [\text{m/s}] \quad (63)$$

Kde: φ – Výtokový součinitel [-]

ρ_x – Hustota přídavného plynu [kg/m^3](50)

Δp_x – Rozdíl tlaků na vstupu do směs. kom. [Pa]

a) Dusík

$$v_{N_2, \text{vtok}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{(70000 - 331) - (65000 - 1152)}{1,96}} = \underline{\underline{27,24}} [\text{m/s}]$$

b) Směsný plyn (dusík + zemní plyn)

$$v_{sp, \text{vtok}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{(70000 - 199) - (60000 - 28)}{1,23}} = \underline{\underline{62,6}} [\text{m/s}]$$

c) PP plyn

$$v_{pp, \text{vtok}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{(70000 - 199) - (60000 - 667)}{1,14}} = \underline{\underline{67,1}} [\text{m/s}]$$

11.1.2 Výpočet průměru vtokových otvorů

Při výpočtech budeme vycházet z rovnice (28), přičemž se objemový průtok plynu bude zmenšovat s počtem vstupních otvorů b [-]. [1]

$$d_{x, \text{vtok}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{V_{sk,x}}{b}}{\pi \cdot v_{x, \text{vtok}}}} = [m]$$

Kde: ϕ – Výtokový součinitel [-]

ρ_x – Hustota přídavného plynu [kg/m³] (50)

Δp_x – Rozdíl tlaků na vstupu do směs. kom. [Pa]

a) Dusík

$$d_{N_2, \text{vtok}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{\dot{V}_{sk, N_2}}{b}}{\pi \cdot v_{N_2, \text{vtok}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{0,007}{3}}{\pi \cdot 27,24}} = \underline{\underline{0,01}} [m]$$

b) Směsný plyn (dusík + zemní plyn)

$$d_{sp, \text{vtok}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{\dot{V}_{sk, sp}}{b}}{\pi \cdot v_{sp, \text{vtok}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{0,033}{3}}{\pi \cdot 62,6}} = \underline{\underline{0,015}} [m]$$

c) PP plyn

$$d_{pp, \text{vtok}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{\dot{V}_{sk, pp}}{b}}{\pi \cdot v_{pp, \text{vtok}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{0,011}{3}}{\pi \cdot 67,1}} = \underline{\underline{0,01}} [m]$$

12. Závěr

V úvodní části se diplomová práce zabývá vlastnostmi a využitím technických a topných plynů, se kterými se můžeme setkat v oblasti směšování plynů. Následně práce plynule přechází do specifikací jednotlivých plynů, které se ve výsledku využijí i pro účely diplomové práce. Konkrétněji se jedná o specifikaci zemního plynu a pyrolýzních plynů. Na konci úvodní části je popsán i samotný směsný plyn, který se skládá ze zemního plynu, dusíku a dvou pyrolýzních plynů, přičemž se jednotlivé pyrolýzní plyny získaly z pyrolýzních procesů, které probíhaly při teplotě 600 [°C].

Pro využití těchto plynů ve směšovací stanici bylo potřeba určit jejich vlastnosti, pro které bylo potřeba zjistit prvkové složení jednotlivých plynů a vlastnosti jednotlivých prvků, které tvoří tyto plyny. Všechny hodnoty jsou uvedeny v **tab.č. 5.1** a **tab.č. 5.2**, přičemž hodnoty z **tab.č. 5.2** byly získány experimentálně a jejich hodnoty byly dodány od vedoucího práce. Z hodnot ve výše zmiňovaných tabulkách bylo možné na základě výpočtových vztahů určit fyzikální vlastnosti pro jednotlivé plyny, přičemž výsledky těchto výpočtu jsou uvedeny v **tab.č. 5.3**.

Pro návrhy jednotlivých rozvodů a samotné směšovací stanice bylo zapotřebí určit i směšovací poměr, který nám zajistí, že výsledný směsný plyn bude mít požadované vlastnosti. Při výpočtu směsného poměru se nabízely dvě možnosti určení směšovacího poměru, a to na konstantní výhřevnost nebo na konstantní Wobbeho číslo. Ovšem v obou případech se objevil parametr, který určoval předmísení zemního plynu s dusíkem, a to z důvodu zahrnutí dusíku do výpočtů a samotné správnosti výpočtu. Nakonec byl zvolen pro další výpočty směšovací poměr podle Wobbeho čísla, jelikož tento poměr zajistí stabilitu hoření směsného plynu v kogenerační jednotce. Tento směšovací poměr je uveden v **tab.č. 6.2**.

V následujících kapitolách jsou navrženy jednotlivé rozvody plynů, které ústí do směšovací stanice a následně je navržen rozvod ze směšovací stanice do kogenerační jednotky. Při těchto návrzích se vycházelo z předpokladů, že jsou jednotlivé plyny zchlazeny na teplotu, která nám zajistí, že vyšší uhlovodíky nebudou v potrubí kondenzovat. A druhým předpokladem bylo, že jsou jednotlivé plyny zbaveny veškerých nečistot, které by mohly potrubí zanášet. Schémata jednotlivých rozvodů jsou uvedena v **přílohách č. 1,2,3 a 4**.

Poslední část diplomové práce řeší samotnou směšovací stanici, tlakové ztráty vzniklé ve směšovací stanici a finální produkt, který vystupuje ze směšovací stanice. Samotná směšovací stanice je tvořena čtyřmi větvemi, které ústí do směšovacích komor, přičemž větve se zemní plynem a dusíkem ústí do směšovací komory, kde vzniká již zmiňovaná předmíšená směs zemního plynu s dusíkem a tato směs pokračuje do směšovací komory ze které vystupuje finální směsný plyn. Pro směšovací stanici jsou vypočteny tlakové ztráty jednotlivých větví, které jsou tvořeny ztrátami v rovném potrubí a místními ztrátami. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v **tab.č. 10.5**.

Součástí směšovací stanice je také směšovací komora, ve které se směšují jednotlivé plyny. Směšovací stanice tyto komory obsahuje dvě, přičemž první z nich slouží ke smíšení zemního plynu s dusíkem a následující slouží k smíšení pyrolýzních plynů a směsného plynu, který tvoří dusík a zemní plyn. Jednotlivé směšovací komory jsou řešeny s tangenciálními vstupy přídatných plynů, a to z důvodu malých tlakových diferencí na vstupech jednotlivých plynů. A na základě těchto tlakových diferencí jsou řešeny i velikosti jednotlivých trysek přídatných plynů. Pro směšovací komoru zemního plynu s dusíkem je vytvořen 3D model s výkresovou dokumentací kompletní komory.

Pro směsný plyn, který vystupuje ze směšovací stanice se určí jeho fyzikální vlastnosti na základě, kterých se určí množství spalin, které tento produkt vyprodukuje po jeho spalení. Hodnoty těchto výpočtů jsou uvedeny v **tab.č. 9.5**.

Seznam použité literatury

- [1] KYSELA, Ladislav. *Plynárenství* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2017-05-08]. Poznámky k přednáškám. VŠB-TU Ostrava.
- [2] JANALÍK, Radim. *Zdroje energie* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2017-05-08]. VŠB-TU Ostrava.
- [3] Technické plyny. *Triomil s.r.o* [online]. 2015 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.triomil.cz/technicke-plyny>
- [4] Technické plyny. MESSER TECHNOGAS s.r.o [online]. Praha, 2012 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z <https://www.messergroup.com/web/messer-technogas-spol.-s.r.o./technicke-plyny>
- [5] Plyny. AIR PRODUCTS spol. s r.o. [online]. Praha 10, 1996 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/products/Gases.aspx>
- [6] Technické plyny. *Linde Gas a.s.* [online]. Praha 9 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: http://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/technicke_plyny/index.html
- [7] Spalování plyných paliv. *Spalovací procesy* [online]. Praha 9: Ing. Přemysl Kól, Ph.D, 2014 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://spalovaci-procesy.wz.cz/index.html>
- [8] Zemní plyn - těžba vlastnosti a rozdělení. *Oenergetice* [online]. Jan Budín, 2015 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/plynarenstvi/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni/>
- [9] TZB I. *TZB I.* [online]. VŠB-TU Ostrava: E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů, 2006 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/studijni-materialy/tzb-1/index.html>
- [10] HLINČÍK, Tomáš. *Topné plyny – vlastnosti a klasifikace* [online]. VŠCHTPraha [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~hlincikt/Z%C3%A1klady%20zpracov%C3%A1n%C3%AD%20a%20vyu%C5%BEit%C3%AD%20uhl%C3%AD%20a%20plynu/8.pdf>
- [11] MALAŤÁK, Jan a Petr JEVIČ. *Přehled pyrolýzních technologií pro zpracování biomasy* [online]. ČZU Praha [cit. 2017-05-08].
- [12] NOVÁK, Lumír. *Technická zpráva*. 16.1.2016. BKB metal, a.s., Moravská Ostrava.

- [13] Kogenerační jednotky. *TEDOM a.s.* [online]. Výčápy, 2017 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: kogenerace.tedom.com/down/759.pdf
- [14] HONUS, Stanislav. *Potenciál energetického využití produktů tepelného rozložení polymerů*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava. Habilitační práce, 205 stran, 2016.
- [15] POLING, Bruce E., John M. PRAUSNITZ a John P. O'CONNELL. *The Properties of Gases and Liquids* [online]. 5. vyd. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2001. ISBN 0070116822. Dostupné z: [doi:10.1036/0070116822](https://doi.org/10.1036/0070116822)
- [16] *Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors (LEL/UEL)* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.mathesontrigas.com/>
- [17] Dynamické viskozity. *Gas encyclopedia* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://encyclopedia.airliquide.com/>

Seznam příloh

Příloha č. 1	Propojení dusíku se směšovací stanicí
Příloha č. 2	Propojení zemního plynu se směšovací stanicí
Příloha č. 3	Propojení pyrolýzních plynů se směšovací stanicí
Příloha č. 4	Propojení směšovací stanice s kogenerační jednotkou
Příloha č. 5	Schéma směšovací stanice
Příloha č. 6	Výkres směšovací komory zemního plynu s dusíkem
Příloha č. 7	Kusovník směšovací komory zemního plynu s dusíkem